



**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM141585**

# **STUDI NUMERIK PENGARUH RASIO UDARA DAN BAHAN BAKAR TERHADAP KARAKTERISTIK CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER PADA BEBAN TINGGI**

AHMAD OBRAIN GHIFARI  
2113100183

DOSEN PEMBIMBING  
DR. BAMBANG SUDARMANTA, ST, MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI NUMERIK PENGARUH RASIO UDARA  
DAN BAHAN BAKAR TERHADAP  
KARAKTERISTIK *CIRCULATING FLUIDIZED  
BED BOILER* PADA BEBAN TINGGI**

AHMAD OBRAIN GHIFARI  
2113100183

DOSEN PEMBIMBING  
DR. BAMBANG SUDARMANTA, ST, MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017



**FINAL PROJECT - TM141585**

**NUMERICAL STUDY OF AIR-FUEL RATIO  
EFFECT TO CHARACTERISTICS OF  
CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER AT  
HIGH LOAD**

**AHMAD OBRAIN GHIFARI  
2113100183**

**SUPERVISOR  
DR. BAMBANG SUDARMANTA, ST, MT.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2017**

**STUDI NUMERIK PENGARUH RASIO UDARA DAN  
BAHAN BAKAR TERHADAP KARAKTERISTIK  
CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER PADA  
BEBAN TINGGI**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**AHMAD OBRAIN GHIFARI**

NRP. 2113 100 183

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT. (Pembimbing)  
NIP. 197301161997021001
2. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc. (Penguji I)  
NIP. 196604021989031002
3. Bambang Arip D, ST, M.Eng. PhD. (Penguji II)  
NIP. 197804012002121001
4. Giri Nugroho, ST, MSc. (Penguji III)  
NIP. 197910292012121002



**SURABAYA**

**JULI, 2017**

# **STUDI NUMERIK PENGARUH RASIO UDARA DAN BAHAN BAKAR TERHADAP KARAKTERISTIK CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER PADA BEBAN TINGGI**

**Nama** : Ahmad Obrain Ghifari  
**NRP** : 2113100183  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI - ITS  
**Pembimbing** : Dr. Bambang Sudarmanta., ST., MT,

## **Abstrak**

*Perkembangan teknologi saat ini sudah semakin maju, menyebabkan manusia mulai berlomba-lomba untuk mencari sumber energi yang paling efisien baik dari segi harga maupun dari segi emisi. Salah satu cara adalah dengan menggunakan boiler jenis Circulating Fluidized Bed (CFB), selain dari segi efisiensi yang dianggap lebih baik dari boiler jenis lainnya, boiler jenis ini juga memiliki emisi  $NO_x$  dan  $SO_x$  yang lebih sedikit dibandingkan boiler jenis Pulverized. Usaha untuk meningkatkan kehandalan dan efisiensi pengoperasian boiler dapat dilakukan dengan merubah beberapa parameter operasi, diantaranya adalah rasio antara udara dan bahan bakar. Berdasarkan hal tersebut perlu diadakan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh rasio udara dan bahan bakar terhadap karakteristik fluidisasi, pembakaran, dan potensi erosi pada CFB boiler.*

*Penelitian dilakukan dengan pemodelan menggunakan perangkat lunak Computational Fluid Dynamics (CFD) komersial untuk mensimulasikan pembakaran dengan variasi rasio udara dan bahan bakar. Pembangkit yang akan dilakukan penelitian adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Air Anyir yang terletak di Provinsi Bangka Belitung. Maksud dari beban tinggi yang disebutkan adalah beban produksi aktual pada 95,33% dari beban maksimal. Data-data yang akan dimasukkan kedalam simulasi ANSYS FLUENT berupa data primary air, secondary air, coal flow inlet dan juga volume fraksi pasir yang berfungsi sebagai*

*media pemanas didalam CFB boiler. Semua data yang disebutkan tadi memiliki boundary conditions sebagai mass-flow inlet. Berdasarkan literatur yang ada rasio udara dan bahan bakar akan dilakukan dengan 4 variasi, yaitu AFR 3.12, AFR 4.72, AFR 6 dan AFR 9. Pembuatan geometri, meshing, dan penentuan domain pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak GAMBIT 2.4.6. Sedangkan simulasi numerik dilakukan dengan perangkat lunak ANSYS FLUENT 16.2, pemodelan yang digunakan adalah multiphase direction, model turbulensi k- $\epsilon$  standar, model pembakaran species transport, dan Discrete Phase Model (DPM).*

*Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai Air-fuel ratio maka hasil dari fluidisasi akan meningkat, pasir yang pada awalnya terletak dibawah furnace akan terangkat ke bagian atas furnace jika AFR meningkat. Peningkatan AFR juga berpengaruh pada banyaknya pasir yang bisa masuk kedalam cyclone, hal ini bisa menyebabkan cyclone mengalami erosi dan bisa mengurangi performa dari cyclone itu sendiri. Hal yang sama juga berlaku pada kontur dan vektor kecepatan udara, semakin tinggi nilai AFR maka kecepatan udara yang ada di furnace dan cyclone akan semakin meningkat. Untuk hasil dari temperatur pembakaran nilai temperatur juga akan meningkat sesuai dengan peningkatan AFR, maka dari itu bisa disimpulkan bahwa dengan meningkatkan AFR maka hasil dari kecepatan, temperatur dan volume fraksi pasir akan ikut meningkat meskipun tidak secara signifikan.*

***Kata kunci : PLTU Air Anyir, Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler, Rasio udara dan bahan bakar, Computational Fluid Dynamics (CFD), Beban tinggi***

# **NUMERICAL STUDY OF AIR-FUEL RATIO EFFECT TO CHARACTERISTICS OF CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER AT HIGH LOAD**

**Name** : Ahmad Obrain Ghifari  
**NRP** : 2113100183  
**Department** : Mechanical Engineering FTI - ITS  
**Advisor** : Dr. Bambang Sudarmanta., ST., MT,

## ***Absract***

*The development of technology at this time is very advanced, this development makes human competing to find the energy source that most efficient from price aspect as well as emission aspect. One of the way is using Circulating Fluidized Bed Boiler type, this type of boiler is considered to have the best efficiency of them all, this type of boiler also have the less NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emission compared to Pulverized type boiler. The effort to enhance the reliability and operation efficiency of the boiler can also be done with little change to the operation parameters, one of the way is to variate the air and fuel ratio. Based on that, we need to conduct a research about the air and fuel ratio effect to fluidization, combustion and erosion potential of CFB boiler.*

*This research is done with the help of Computational Fluid Dynamics (CFD) software to simulate the combustion with the variation of air and fuel ratio. The power plant that we will conduct a research is Coal Fired Steam Power Plant Air Anyir located at Bangka Belitung Province. The data that will be used will be inserted to ANSYS FLUENT simulation like primary air, secondary air, coal inlet flow and also sand volume fraction with the function as the heating media inside the CFB boiler. All the data mention above is as mass-flow inlet in the boundary conditions. Based on the literature, the variation of air and fuel ratio will be conducted with four variation, AFR 3.12, AFR 4.72, AFR 6 and AFR 9. The making of geometry, meshing and domain decision of the model will be conducted with GAMBIT 2.4.6 software. The numerical simulation will be conducted with ANSYS FLUENT 16.2 software,*

*model that will be used is multiphase direction,  $k-\epsilon$  standard turbulence model, specie transport combustion model and Discrete Phase Model (DPM).*

*The result of the simulation shows that with the escalation of the air and fuel ratio so the result of the fluidization is also escalate, the sand that at the beginning located at the bottom furnace will lifted to the upper furnace if the AFR escalate. The escalation of AFR is take effect to the amount of the sand that entering the cyclone, this matter will make cyclone experience the erosion by the sand and will reduce the performance of the cyclone. The same thing is applied to the velocity contour and vector of the air, with the escalation of the AFR so the air velocity in the furnace and cyclone will also increase. For the result of combustion temperature the value of the temperature will also escalate if the air-fuel ratio is increasing, so the conclusion is with the increasing of air-fuel ratio so the velocity, temperature and sand volume fraction will also increase although not with significant amount.*

***Key words : Coal Fired Steam Power Plant Air Anyir, Circulating Fluidized Bed Boiler, Air and fuel ratio, Computational Fluid Dynamics, High Load***



## **KATA PENGANTAR**

### **Assalamualaikum Wr.Wb**

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT, Tuhan Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, karena atas segala nikmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Shalawat dan salam penulis ucapkan kepada Nabi Muhammad SAW yang membawa cahaya keimanan dan agama Islam sebagai pedoman kehidupan untuk selalu bertaqwa dan beriman kepada Allah SWT.

Dalam pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapatkan bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu pada halaman ini, penulis ingin memberi hormat dan ungkapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ayah dan Ibu tercinta, Subli Ibrahim dan Yusnani Azis yang selalu mendukung, memberikan kasih sayang dan tak henti-hentinya mendoakan penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini. Terima kasih ayah dan ibu atas segalanya
2. Kakak dan adik tercinta, Tami, Farhan dan Hazira yang selalu mendukung dan mendoakan penulis.
3. Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan ide, pembelajaran dan pengetahuan yang tidak ternilai harganya bagi penulis untuk memberikan hasil yang bermanfaat.
4. Bapak Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc, Bapak Bambang Arip Dwiyanoro, ST, M.Eng, PhD, dan Bapak Giri Nugroho, ST, MSc selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan kritik dan saran terhadap penulis dan memberikan pembelajaran kepada penulis.
5. Ibu Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA sebagai dosen wali penulis, terima kasih untuk saran-saran serta bimbingannya dalam merencanakan perkuliahan penulis selama ini.

6. Segenap dosen Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah mencurahkan segala tenaga dan pikiran serta pengalaman dalam mendidik penulis dalam bidang keteknikan maupun ilmu tentang kehidupan selama penulis menempuh pendidikan sarjana di Teknik Mesin ITS
7. Seluruh keluarga besar penulis yang tak henti mendukung, menyemangati, dan mendoakan penulis selama perkuliahan.
8. Seluruh keluarga M56 yang telah menemani penulis dari pengkaderan hingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan. Untukmu angkatanku sahabat sejutiku.
9. Rizki M Wijayanto, Ahmad Tarmizi dan Bayu Adi Muliawan selaku partner tugas akhir dibawah bimbingan bapak Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT.
10. Keluarga Laboratorium Rekayasa Termal : Alija, Hiro, Alim, Ismail, Ivan, Jofie, Kevin, Hendy, Rini, Nana, Karina, Canny dan Nurul yang selalu membantu dan menghibur penulis selama mengerjakan tugas akhir di lab. Semoga kesuksesan selalu menyertai kita.
11. Seluruh pihak civitas akademika Teknik Mesin FTI-ITS.

Penulis berharap agar tugas akhir ini bermanfaat untuk pembaca dan perkembangan ilmu pengetahuan kedepannya.

Wassalamualaikum Wr.Wb

Surabaya, 26 Juli 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
TITLE PAGE	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii

## BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 <i>Boiler</i> .....	7
2.1.1 <i>Boiler</i> PLTU Air Anyir Bangka.....	9
2.2 <i>Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler</i> .....	11
2.2.1 Prinsip Kerja CFB.....	12
2.2.2 Skema Pembangkit CFB.....	13
2.2.3 Keuntungan Sistem CFB.....	14
2.2.4 Penelitian oleh Kumar dan Pandey.....	15
2.2.5 Penelitian Terdahulu pada <i>Cyclone</i> .....	19
2.3 Bahan Bakar Batubara.....	20
2.3.1 Klasifikasi Batubara.....	21
2.4 Pembakaran.....	24
2.4.1 Reaksi Pembakaran.....	25

2.4.2	Pembakaran Tiga T.....	26
2.4.3	Perhitungan Stoikiometri Pembakaran.....	27
2.5	<i>Numerical Model</i> .....	28
2.6	<i>Air-fuel Ratio</i> .....	29
2.7	<i>Excess Air</i> .....	31
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>		
3.1	Objek Penelitian.....	33
3.2	Tahapan Penelitian.....	33
3.3	<i>Flowchart</i> Penelitian.....	34
3.4	Tahap Pemodelan dan Simulasi.....	36
3.4.1	<i>Pre-processing</i> .....	36
3.4.2	<i>Processing</i> .....	38
3.4.3	<i>Post-processing</i> .....	43
3.5	Rancangan Penelitian.....	45
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Properties Bahan Bakar.....	47
4.2	Hasil Geometri Set-up.....	47
4.3	Analisa Karakteristik Fluidisasi.....	51
4.3.1	Analisa Volume Fraksi Pasir.....	51
4.3.2	Analisa Kecepatan Udara <i>Superficial</i> .....	57
4.4	Analisa Erosi Akibat Pasir.....	62
4.5	Analisa Karakteristik Pembakaran.....	67
<b>BAB V PENUTUP</b>		
5.1	Kesimpulan.....	73
5.2	Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA.....		75
LAMPIRAN.....		77

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sketsa Sistem CFB.....	12
Gambar 2.2	Skema Dasar CFBC <i>Boiler</i> .....	13
Gambar 2.3	Gambar <i>Boiler</i> dalam 3D.....	15
Gambar 2.4	Kontur dari Temperatur Total.....	16
Gambar 2.5	Kontur dari Tekanan Statis.....	17
Gambar 2.6	Kontur dari Energi Kinetik Turbulen.....	17
Gambar 2.7	Grafik Temperatur versus <i>Fluidizing Velocity</i> ...18	
Gambar 2.8	Grafik Temperatur versus <i>Fluidizing Velocity</i> ...18	
Gambar 2.9	Grafik Konvergensi.....	19
Gambar 2.10	<i>Velocity Magnitude</i> untuk <i>Cyclone Separator</i> ...20	
Gambar 2.11	<i>Vorticity Magnitude</i> untuk <i>Cyclone Separator</i> ..20	
Gambar 2.12	Klasifikasi Batubara.....	23
Gambar 2.13	Pembakaran yang Sempurna, Baik dan Tidak Sempurna.....	27
Gambar 3.1	<i>Boiler</i> dan <i>Cyclone</i> PLTU Air Anyir Bangka Tampak Samping dan Iso-metri pada FLUENT.....	36
Gambar 3.2	<i>Meshing Boiler</i> PLTU Air Anyir Bangka.....	37
Gambar 3.3	(a) <i>Plane</i> yang Diambil untuk Setiap Elevasi <i>Boiler</i> . (b) <i>Plane x</i> dan <i>Plane z</i> untuk Mengambil Tampilan Kontur.....	44
Gambar 4.1	Titik-titik pengukuran pada penampang vertikal dan horizontal.....	48
Gambar 4.2	Pandangan depan, kanan dan isometris geometri.....	48
Gambar 4.3	Pathline udara pembakaran sepanjang geometri domain simulasi (a).....	49
Gambar 4.4	Pathline udara pembakaran sepanjang geometri domain simulasi (b).....	50
Gambar 4.5	Volume fraksi pasir sumbu-x AFR 3.12.....	52

Gambar 4.6	Volume fraksi pasir sumbu-x AFR 4.72.....	52
Gambar 4.7	Volume fraksi pasir sumbu-x AFR 6.00.....	53
Gambar 4.8	Volume fraksi pasir sumbu-x AFR 9.00.....	53
Gambar 4.9	Volume fraksi pasir pada pandangan isometri untuk AFR 3.12 (a) dan 4.72 (b).....	54
Gambar 4.10	Volume fraksi pasir pada pandangan isometri untuk AFR 3.12 (a) dan 4.72 (b).....	55
Gambar 4.11	Grafik volume fraksi pasir pada garis tengah furnace untuk tiap variasi AFR.....	56
Gambar 4.12	Kontur udara pada variasi AFR 3.12.....	57
Gambar 4.13	Kontur udara pada variasi AFR 4.72.....	58
Gambar 4.14	Kontur udara pada variasi AFR 6.00.....	58
Gambar 4.15	Kontur udara pada variasi AFR 9.00.....	59
Gambar 4.16	Grafik kecepatan udara <i>superficial</i> pada garis tengah furnace untuk setiap variasi AFR.....	60
Gambar 4.17	Vektor kecepatan pasir untuk variasi elevasi pada <i>furnace</i> dan <i>cyclone</i> AFR 3.12.....	62
Gambar 4.18	Vektor kecepatan pasir untuk variasi elevasi pada <i>furnace</i> dan <i>cyclone</i> AFR 4.72.....	63
Gambar 4.19	Vektor kecepatan pasir untuk variasi elevasi pada <i>furnace</i> dan <i>cyclone</i> AFR 6.00.....	63
Gambar 4.20	Vektor kecepatan pasir untuk variasi elevasi pada <i>furnace</i> dan <i>cyclone</i> AFR 9.00.....	64
Gambar 4.21	Grafik kecepatan pasir pada penampang tengah <i>furnace</i> untuk setiap variasi AFR.....	66
Gambar 4.22	Kontur temperatur untuk AFR 3.12 pada sumbu- x dan sumbu-y variasi elevasi <i>furnace</i> (satuan kelvin).....	68
Gambar 4.23	Kontur temperatur untuk AFR 4.72 pada sumbu- x dan sumbu-y variasi elevasi <i>furnace</i> (satuan kelvin).....	68
Gambar 4.24	Kontur temperatur untuk AFR 6.00 pada sumbu- x dan sumbu-y variasi elevasi <i>furnace</i> (satuan kelvin).....	69

Gambar 4.25	Kontur temperatur untuk AFR 9.00 pada sumbu-x dan sumbu-y variasi elevasi <i>furnace</i> (satuan kelvin).....	69
Gambar 4.26	Grafik temperatur pembakaran pada penampang tengah <i>furnace</i> untuk setiap variasi AFR.....	72

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Spesifikasi Tipe-tipe Boiler.....	8
Tabel 2.2	Data Spesifikasi <i>Boiler</i> PLTU Air Anyir Bangka.....	9
Tabel 2.3	Spesifikasi Batubara pada PLTU Air Anyir.....	10
Tabel 2.4	Bentuk Reaksi Kimia Bahan Bakar.....	25
Tabel 3.1	<i>Models</i> yang digunakan dalam Simulasi CFB <i>Boiler</i> PLTU Air Anyir Bangka.....	38
Tabel 3.2	<i>Ultimate Analysis</i> dan <i>Proximate Analysis</i> Batubara yang Digunakan PLTU Air Anyir.....	39
Tabel 3.3	<i>Properties</i> Batubara CFB <i>Boiler</i> PLTU Air Anyir...	40
Tabel 3.4	<i>Properties</i> Pasir pada Bed Material CFB Boiler PLTU Air Anyir.....	40
Tabel 3.5	<i>Boundary Conditions</i> yang digunakan dalam Permodelan.....	41
Tabel 3.6	Variasi <i>Air – Fuel Ratio</i> (AFR).....	42
Tabel 3.7	Parameter <i>Input</i> Penelitian.....	46
Tabel 3.8	Parameter <i>Output</i> Penelitian.....	46
Tabel 4.1	<i>Properties</i> Bahan Bakar Batu Bara.....	47
Tabel 4.2	Variasi <i>Air – Fuel Ratio</i> (AFR).....	51

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Jumlah pertumbuhan penduduk di dunia telah mengalami perkembangan pesat yang di ikuti dengan peningkatan kebutuhan. Menurut data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, penyediaan listrik di Indonesia pada akhir tahun 2014 berkisar pada 228.554,90 GWh yang terdiri dari produksi tenaga listrik PLN dan pembelian listrik [1]. Oleh karena itu, manusia melakukan berbagai upaya untuk memenuhi kebutuhannya dengan cara mengolah sumber daya yang disediakan oleh alam. Sebagai contoh, penggunaan energi tidak lagi hanya terpaku pada energi bahan bakar minyak (BBM) tetapi juga menggunakan batubara. Berbagai macam pembangkit listrik dibuat oleh manusia dan dibedakan berdasarkan sumber energi mentahnya sebagai contoh : Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) bahkan yang paling modern sekarang adalah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan pembangkit listrik yang menggunakan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Energi dari uap yang berupa energi kinetik diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan generator. Umumnya, pembangkit listrik tenaga uap menggunakan bahan bakar batu bara. PLTU merupakan pembangkit listrik yang paling banyak digunakan, karena efisiensinya yang tinggi. Hal ini membuat proses dari pembangkit listrik ini akan lebih ekonomis.

PLTU yang memiliki *boiler* sebagai komponen utamanya juga dibagi menjadi beberapa macam jika berdasarkan kapasitas kerja boilernya, salah satu contohnya adalah *boiler* jenis *stoker firing* yang memiliki kapasitas ketika bekerja adalah maksimal 80 MW. *Boiler* jenis lainnya adalah *Pulverised Coal Combustion* (PCC), Pada PCC, proses pembakaran terjadi pada campuran batubara dan udara, serta batu kapur. Pada proses pembakaran tersebut, terjadi reaksi kimia dan perpindahan panas yang lebih

optimal. Boiler jenis ini digunakan pada pembangkit berkapasitas cukup tinggi dan bervariasi yaitu kurang lebih  $> 500$  MW. *Circulating Fluidized Bed* (CFB) merupakan salah satu alternatif dari proses pembakaran. Pada *fluidized-bed combustor*, proses pembakaran berlangsung pada saat campuran bahan bakar, *sorbent*, dan partikel *fuel ash* bergabung dengan *primary air* untuk membentuk aliran turbulen. Gas yang melingkupi material padat pada ruang bakar tersebut memungkinkan karakteristik melayang pada ruang bakar [2].

PLTU Air Anyir adalah pembangkit 2 X 30 MW milik PLN yang dioperasikan oleh PT PJBS. PLTU Air Anyir berlokasi di kecamatan Merawang, Kab. Bangka, Kepulauan Bangka Belitung dan terletak di tepi sungai Batu Rusa yang bermuara di selat Karimata. PLTU Air Anyir ini dioperasikan menggunakan *Boiler* tipe CFB (*Circulating Fluidized Bed*). Banyak parameter penting yang harus diperhatikan agar boiler tipe CFB ini dapat beroperasi dengan optimal, efisien dan handal [3]. Pengoperasian *boiler* berdasarkan SOP sangat diperlukan agar tidak terjadi mal operasi dilapangan. Diantara parameter penting didalam pengoperasian *boiler* CFB adalah *primary air flow*, *secondary air flow*, *coal flow*, *bed material properties* dan *coal properties*.

Teknologi CFB memiliki beberapa kelebihan, dimana penggunaannya sangat fleksibel. Proses pembakaran pada CFB *boiler* memiliki temperatur maksimal sekitar  $900^{\circ}\text{C}$ , jauh dibawah temperatur kerja PCC *boiler* yang berkisar  $1300^{\circ}\text{C} - 1700^{\circ}\text{C}$ . Hal ini membuat emisi  $\text{NO}_x$  dapat berkurang. Walaupun pembakaran pada CFB *boiler* memiliki temperatur operasi yang tergolong rendah, partikel panas yang terus bersikulasi membuat perpindahan panas lebih efisien serta waktu tunggu dari pembakaran dan reaksi kimia dari batubara dapat berkurang. Untuk meningkatkan kehandalan dan efisiensi pengoperasian boiler ini dapat dilakukan berdasarkan tinjauan empiris dan praktikal dilapangan, metode ini dilakukan dengan cara *trial* dan *error* berdasarkan rujukan dari referensi manual operasi maupun literatur buku CFB *Boiler*, namun metode ini memiliki keterbatasan diantaranya adalah

manuver-manuver operasi tidak dapat dilakukan lebih luas dan fleksibel karena terkendala dengan keamanan pengoperasian unit. Metode yang bisa digunakan adalah metode analisa menggunakan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD), metode ini menggunakan bantuan *software* ANSYS FLUENT. Dengan melakukan simulasi ini, pengguna dapat melakukan berbagai perubahan pola operasi maupun desain tanpa memberikan dampak langsung terhadap kondisi operasi di lapangan, sehingga analisa dapat dilakukan lebih mendalam, terukur dan lebih aman. Dengan metode ini perubahan parameter operasi maka kondisi pembakaran dan dampak erosi pada boiler dapat diketahui secara langsung untuk kemudian dilakukan optimalisasi.

Untuk melakukan simulasi ini, diperlukan beberapa model dan *boundary conditions* yang berguna untuk menjalankan simulasi ini. Sebagai contoh untuk model turbulensi yang digunakan adalah jenis  $k-\epsilon$  standar, jenis ini dipilih karena model ini mampu menyelesaikan permasalahan *heating*, *buoyancy* dan *combustion* sekaligus. Model yang digunakan untuk pembakaran adalah *species transport-reaction*, model ini dipilih karena spesies kimia yang diinjeksikan mempunyai reaksi kimia (pembakaran) yang telah didefinisikan pada material yang digunakan [4]. Selain itu *Discrete Phase Model* dibuat *ON* yang berfungsi untuk mendefinisikan injeksi untuk batubara. Model *multiphase* dibuat *ON* dan dipilih metode *Eulerian*, metode ini dipilih karena mampu mendefinisikan *properties* dari ketiga fase dan interaksi ketiganya.

Banyak parameter yang bisa mempengaruhi karakteristik fluidisasi maupun pembakaran yang terjadi didalam CFB boiler, salah satu yang paling penting adalah rasio udara dan bahan bakar atau *air-fuel ratio*. *Air-fuel ratio* memiliki pengaruh langsung pada emisi gas buang  $\text{NO}_x$  yang semakin sedikit AFR-nya maka emisi gas buang dari  $\text{NO}_x$  juga akan semakin sedikit, hal ini menjadi sangat penting karena  $\text{NO}_x$  merupakan senyawa yang berbahaya dan emisinya diinginkan seminimal mungkin pada saat proses pembakaran di CFB boiler berlangsung. Emisi gas buang  $\text{NO}_x$  juga merupakan salah satu parameter output penelitian yang akan dilihat

fraksi volumenya didalam *boiler*. Teori ini merujuk pada salah satu penelitian tugas akhir yang dilakukan mahasiswa Teknik Mesin FTI-ITS [5] yang mengatakan bahwa jika AFR 3 : 1 maka nilai fraksi massa emisi  $\text{NO}_x$  adalah 0.00035 sedangkan untuk AFR 5 : 1 nilai fraksi massa emisi  $\text{NO}_x$  adalah 0.00075.

Berdasarkan uraian tersebut, akan dilakukan penelitian terkait variasi *air-fuel ratio* terhadap performa boiler yang ada di PLTU Air Anyir Bangka. Performa dari boiler ini akan bisa dinilai dengan melihat baik dari karakteristik pembakaran ataupun dari kemampuannya untuk memfluidisasi pembakaran tersebut. *Air-fuel ratio* dalam hal ini adalah perbandingan antara udara yang masuk ke *boiler* dan juga bahan bakar yang masuk ke *boiler*. Udara yang masuk ke dalam *boiler* bisa diatur melalui *primary air flow* dan *secondary air flow*. Sedangkan bahan bakar yang masuk berupa batubara masuk melalui 3 jalur *coal flow*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, akan dilakukan penelitian untuk mengetahui fenomena yang terjadi di dalam boiler jika dilakukan proses pembakaran dengan memvariasikan nilai *air-fuel ratio* terhadap proses fluidisasi yang dihasilkan didalam boiler pada beban produksi tinggi. Selain itu juga akan dibahas bagaimana pengaruh *air-fuel ratio* terhadap karakteristik pembakaran yang dihasilkan pada saat beban produksi tinggi. Karakteristik yang bisa dihasilkan antara lain distribusi temperatur, distribusi kecepatan dan juga volume fraksi dari pasir yang ada di CFB *boiler*. Selain itu masalah yang akan diangkat adalah bagaimana distribusi kecepatan didalam *cyclone* yang akan menyebabkan daerah tersebut rawan terjadi erosi. Cara memvariasikan nilai *air-fuel ratio* adalah dengan menaikkan jumlah udara yang masuk ataupun dengan menurunkan jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam *boiler*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan cara menaikkan jumlah udara yang dimasukkan ke dalam *boiler*. Beban produksi tinggi yang dimaksud adalah saat beban operasional sebesar  $\pm 95,33\%$ .

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan yang diambil pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Simulasi pembakaran secara *three dimensional* (3D) dilakukan pada sebuah model *boiler* yang telah ditentukan geometrinya.
2. Software yang digunakan pada tahap pembuatan geometri boiler adalah software GAMBIT 2.4.6, sedangkan untuk tahap simulasi pembakaran menggunakan software ANSYS FLUENT 16.2.
3. Simulasi yang dilakukan dengan asumsi campuran batu bara dan udara terbakar sempurna.
4. Data-data operasi yang dibutuhkan seperti nilai *primary air flow*, *secondary air flow*, *coal flow* dan data-data lainnya diperoleh dari data *commissioning* dan operasional PLTU Air Anyir Bangka pada beban produksi operasional sebesar  $\pm 95,33\%$ .
5. Fluida dianalisa sebagai *compressible* gas.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui proses fluidisasi yang terjadi didalam *boiler* jika divariasikan nilai *air-fuel ratio* pada beban produksi tinggi menampilkan nilai volume fraksi pasir dalam bentuk grafik dan kontur.
2. Mengetahui karakteristik pembakaran yang terjadi pada *boiler* berdasarkan visualisasi distribusi temperatur dan distribusi kecepatan pada beban produksi tinggi.
3. Mengetahui daerah-daerah rawan erosi yang bisa terjadi didalam *cyclone* dengan melihat distribusi kecepatan udara saat didalam *cyclone*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mampu mengetahui bagaimana terjadi fenomena pembakaran dan proses fluidisasi di dalam boiler dengan memvariasikan nilai *air-fuel ratio*.
2. Mampu mengoperasikan *software* ANSYS FLUENT sesuai dengan fungsinya.
3. Mampu memberikan rekomendasi bagaimana data optimal yang bisa dioperasikan oleh PLTU Air Anyir Bangka.



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah suatu sistem pembangkit tenaga listrik yang mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan uap air sebagai fluida kerjanya, yaitu dengan memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakkan poros sudu-sudu turbin. Selanjutnya poros turbin akan menggerakkan generator. Dan dari generator inilah kemudian dibangkitkan energi listrik. Batubara merupakan yang paling banyak digunakan sebagai bahan bakar PLTU, selain karena harga yang lebih bervariasi dan terjangkau juga ketersediaannya yang cukup melimpah.

#### **2.1     *Boiler***

Salah satu dari 4 (empat) peralatan utama yang sangat penting di dalam suatu pembangkit listrik adalah *boiler* atau biasa disebut ketel uap. Alat ini merupakan alat penukar panas yang menghasilkan uap pada tekanan dan temperatur tinggi (*superheated vapour*). Perubahan dari fase cair menjadi uap dilakukan dengan memanfaatkan energi panas yang didapatkan dari pembakaran bahan bakar. *Boiler* terdiri dari 2 (dua) komponen utama, yaitu ruang bakar (*furnace*) yang berfungsi sebagai alat untuk mengubah energi kimia menjadi energi panas dan alat penguapan yang terdiri dari pipa-pipa penguap (*water walls*) yang mengubah energi pembakaran menjadi energi potensial uap (energi panas). Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran dan panas pembakaran yang diberikan.

Di dalam *boiler* banyak siklus yang terjadi, yaitu proses pembakaran bahan bakar dan proses penguapan air menjadi uap yang digunakan untuk memutar turbin. Perpindahan panas dalam *boiler* terjadi pada 3 proses, yaitu:

1. Radiasi di ruang bakar (*furnace*)
2. Konveksi di *economizer*, *air heater* dan *primary superheater*

3. Kombinasi radiasi dan konveksi di *secondary superheater* dan *reheater*

Fungsi utama *Boiler* adalah:

1. Untuk memproduksi uap sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan, baik kuantitas maupun kualitasnya
2. Memanaskan uap jenuh yang dihasilkan menjadi uap panas lanjut sebelum digunakan untuk memutar turbin
3. Memanaskan ulang uap bekas memutar HP turbin sebagai metode pengembalian kualitas uap untuk memutar IP dan LP turbin

*Boiler* sendiri terdiri dari berbagai macam jenis, bisa tergantung dari beban yang bisa diaplikasikan ataupun dari spesifikasi lainnya. Pada Tabel 2.1 akan ditampilkan perbandingan antara masing-masing *boiler* yang ada.

Tabel 2.1 Perbandingan Spesifikasi Tipe-tipe *Boiler* [2]

Karakteristik	<i>Stoker</i>	<i>Bubbling</i>	<i>Circulating</i>	<i>Pulverized</i>
<i>Height of bed or fuel burning zone</i> (m)	0.2	1 – 2	10 – 30	27 – 45
<i>Excess air</i> (%)	20 – 30	20 – 25	10 – 20	15 – 30
<i>Grate heat release rate</i> (MW/m <sup>2</sup> )	0.5 – 1.5	0.5 – 1.5	3.0 – 4.5	4 – 6
<i>Coal size</i> (mm)	32 – 6	6 – 0	6 – 0	< 0.1
<i>Turn down ratio</i>	4 : 1	3 : 1	3 – 4 : 1	3 : 1
<i>Combustion efficiency</i> (%)	85 – 90	90 – 96	95 – 99.5	99 – 99.5
<i>Nitrogen oxide</i> (Ppm)	400 – 600	300 – 400	50 – 200	400 – 600

<i>Sulfur dioxide capture in furnace (%)</i>	<i>None</i>	80 - 90	80 - 90	<i>None</i>
----------------------------------------------	-------------	---------	---------	-------------

### 2.1.1 Boiler PLTU Air Anyir Bangka

PLTU Air Anyir adalah pembangkit 2 X 30 MW milik PLN yang dioperasikan oleh PT PJBS. PLTU Air Anyir berlokasi di kecamatan Merawang, Kab. Bangka, Kepulauan Bangka Belitung dan terletak di tepi sungai Batu Rusa yang bermuara di selat Karimata [3]. PLTU Air Anyir ini dioperasikan menggunakan *boiler* tipe CFB (*Circulating Fluidized Bed*). Banyak parameter penting yang harus diperhatikan agar *boiler* tipe CFB ini dapat beroperasi dengan optimal, efisien dan handal. Pengoperasian *boiler* berdasarkan SOP sangat diperlukan agar tidak terjadi kegagalan operasi dilapangan. Diantara parameter penting didalam pengoperasian boiler CFB adalah *Primary air flow*, *secondary air flow*, *coal flow*, *bed material properties*, *coal properties*, dan lain-lain.

Berikut ini adalah spesifikasi Boiler PLTU Air Anyir:

Tabel 2.2 Data Spesifikasi *Boiler* PLTU Air Anyir Bangka [3]

NO	Parameter	Spesifikasi
1	<i>Boiler quantity</i>	2 unit
2	<i>Boiler mode</i>	CG-130/9.81 – MX19
3	<i>Boiler Maximal continues rate</i>	130 t/h
4	<i>Nominal Steam temperature</i>	540° C
5	<i>Nominal Steam Pressure</i>	9.81 Mpa
6	<i>Feed water temperature</i>	219° C
7	<i>Feed Water temp. Without HP heater</i>	158.10° C

8	<i>Air Inlet air preheater</i>	300° C
9	<i>Drum working Pressure</i>	10.9 Mpa
10	<i>Boiler Type</i>	CFB
11	<i>Fuel</i>	Coal, oil & Mix firing
12	<i>Coal calory HHV</i>	4000Cal/kg
13	<i>Boiler Thermal Effisiensi</i>	>85%
14	<i>Manufacture by</i>	SICHUAN CHUANGUO BOILER CO., LTD CHINA

Spesifikasi dari batubara yang digunakan pada PLTU Air Anyir berupa *proximate analysis*, *ultimate analysis*, dan *gross heating value* dapat dilihat pada tabel 2.3. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa batubara yang digunakan di PLTU Air Anyir adalah batubara jenis lignite A.

Tabel 2.3 Spesifikasi Batubara pada PLTU Air Anyir

No	Deskripsi	Desain	Pengecekan 1	Pengecekan 2
<b>A</b>	<b><i>Proximate Analysis (% as received)</i></b>			
1	<i>Total Moisture</i>	30	28,6	33
2	<i>Inherent Moisture</i>	18	13,8	25
3	<i>Ash</i>	5	4,6	5,5
4	<i>Volatile Matter</i>	35	34,5	32,7
5	<i>Fixed Carbon</i>	30	32,3	28,8
<b>B</b>	<b><i>Ultimate Analysis (% DAF)</i></b>			
1	Karbon	70,49	69,46	68,8
2	Hidrogen	3,35	4,76	3,415

3	Nitrogen	1,147	1,557	1,17
4	Oksigen	23,215	23,922	24,439
5	Sulphur	1,8	0,3	2,179
C	<b>Gross Calorific Value</b>	4000	4300	3700
	(Kcal/kg) ( <i>as received</i> )	16,74	17,99	15,48
	(Mj/kg) ( <i>as received</i> )			

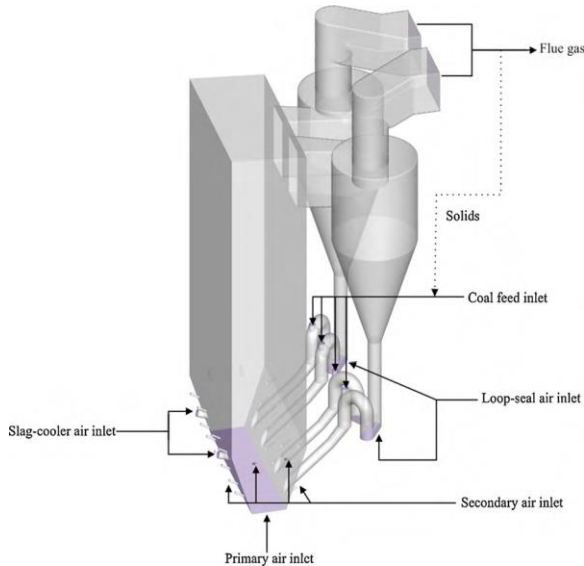
## 2.2 *Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler*

Pada setiap pembangkit listrik tenaga uap, pasti terdiri dari berbagai macam sistem yang menunjang sistem utama dari pembangkit tersebut. Salah satu sub-sistem yang paling penting untuk menunjang operasi dari pembangkit tersebut adalah *boiler*. *Boiler* atau disebut ketel uap adalah sistem di pembangkit listrik yang berfungsi untuk mengubah energi mentah atau bahan bakar menjadi uap yang nantinya bisa digunakan untuk menggerakkan turbin dan dengan tujuan akhir bisa mendapat energi listrik yang bisa digunakan untuk berbagai keperluan. Cara *boiler* merubah bahan bakar menjadi uap adalah dengan membakar bahan bakar dengan temperature yang cukup sehingga bahan bakar akan menjadi uap. Dalam hal ini, bahan bakar yang digunakan oleh pembangkit listrik tenaga uap di Bangka dan Belitung adalah batubara dengan tingkat konsentrasi karbon yang berbeda-beda.

*Circulating Fluidized Bed (CFB) boiler* adalah *boiler* yang digunakan di PLTU Bangka dan Belitung. Boiler sendiri memiliki berbagai macam jenis, seperti *Athmospheric Fluidized Bed Combustion (AFBC) boiler*, *Fluidized Bed Combustion (FBC) boiler* dan yang akan dibahas kali ini adalah *Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) boiler*. Untuk setiap jenis boiler sendiri ada keunggulan dan kekurangannya masing-masing, tetapi untuk boiler jenis CFB semakin banyak digunakan karena

keunggulannya pada aspek efisiensi operasi yang tinggi dan efek buruk yang minimum kepada lingkungan sekitar.

### 2.2.1 Prinsip Kerja CFB

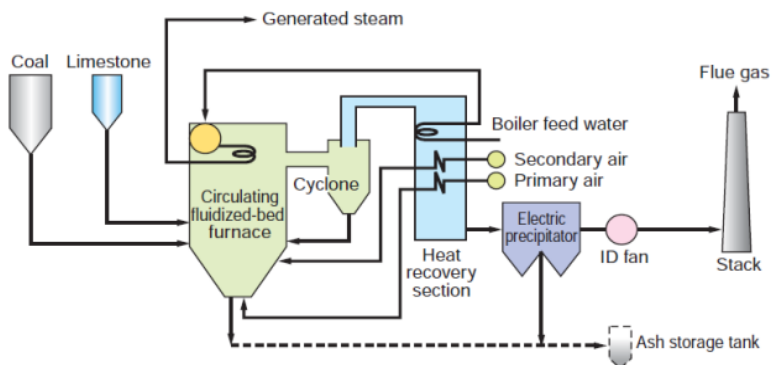


Gambar 2.1 Sketsa Sistem CFB [6]

Secara umum sistem CFB terdiri dari 3 komponen yang penting yaitu, *riser*, *cyclone* dan *return leg*. Gambar 2.1 menunjukkan sketsa dari sistem CFB secara umum. Partikel berupa udara memasuki *boiler* melalui *riser*, membuat sekumpulan udara di bawah *riser*. *Particle bed* dibuat dalam gerakan bebas oleh aliran gas yang bergerak ke atas, atau cairan maka dari itu disebut istilah “*fluidized bed*”. Dengan meningkatkan kecepatan dari aliran gas yang mengarah keatas, maka partikel juga akan bergerak ke bagian atas *riser*. Ketika kecepatan udara cukup tinggi maka partikel akan keluar dari *riser* dan akan masuk ke *cyclone*. Dalam *cyclone* partikel akan dipisahkan dari gas yang akan mengalir

keluar, dan akan mengalir kembali melalui *return leg*. Fungsi dari *return leg* sesuai dengan namanya, fungsinya adalah mengembalikan kembali partikel ke bagian bawah riser, maka dari itulah disebut istilah “*circulating*”. Didalam *boiler* tipe CFB juga terdapat pasir yang berfungsi untuk memfluidisasi boiler tersebut atau berfungsi sebagai media pemanas didalam *boiler* ini, inilah perbedaan *boiler* tipe CFB dengan *boiler* tipe *pulverized* yang tidak memiliki pasir didalamnya tetapi batubara yang digunakan sudah berupa serpihan yang sangat halus hingga akan mudah terbakar oleh *boiler*. Dengan adanya pasir ini, proses fluidisasi akan cepat terjadi karena pasir akan membuat *fluidized bed*.

### 2.2.2 Skema Pembangkit CFB



Gambar 2.2 Skema Dasar CFBC Boiler [7]

Gambar 2.2 menunjukkan skema dasar dari sistem pembangkit yang menggunakan CFB sebagai jenis *boiler*-nya. Bisa dilihat bahwa ada jalur masuk *limestone*, *limestone* adalah salah satu jenis material yang bisa digunakan sebagai *fluidized bed*, material lain yang bisa digunakan adalah pasir, pasir inilah yang digunakan sebagai *fluidized bed* di PLTU Air Anyir Bangka.

### 2.2.3 Keuntungan Sistem CFB

Sistem CFB sendiri memiliki banyak keuntungan lain selain yang telah dijelaskan sebelumnya yaitu efisiensi operasi yang cukup tinggi dan juga efek buruk yang minimum terhadap lingkungan sekitarnya. Keuntungan lainnya adalah sebagai berikut :

#### 1. Fleksibilitas Bahan Bakar [2]

Maksud dari fleksibilitas bahan bakar adalah CFB *boiler* bisa menggunakan berbagai jenis bahan bakar untuk bisa dioperasikan, terutama saat pasar bahan bakar yang sangat fluktuatif harga dan ketersediaannya saat ini. Dibawah akan diperlihatkan tabel bahan bakar yang bisa digunakan oleh CFB *boiler*.

Primary fuels	Waste fuels
Petroleum coke	Anthracite culm
Anthracite	Bituminous gob <sup>a</sup>
Bituminous coal	Coal washing reject and wastes
Sub-bituminous coal	Sewage sludge
Brown coal	Classified industrial waste
Lignite	Pulps from paper industries
Peat	Agricultural waste
Oil shale	Animal wastes and carcass
Wood and other biomass	Deinking, paper mill sludge
Bitumen and asphaltenes	Shredded tires
Refuse derived fuel (RDF)	Gasifier waste (unburnt carbon)
Sawdust, bark	Battery cases (lead removed)
Natural or "off" gases	Waste wood from demolition and railroad sleepers
Oil including heavy oil refinery bottom	Plastics

#### 2. Emisi NO<sub>x</sub> yang Rendah [2]

Emisi NO<sub>x</sub> yang rendah adalah keuntungan lain dari sistem CFB Boiler. Data yang dikumpulkan dari CFB yang beroperasi sekarang menunjukkan emisi NO<sub>2</sub> pada 50-150 ppm (Hiltunen and Tang 1988) atau 20-150 mg/MJ (Kullendorff et al. 1988). Level emisi NO<sub>2</sub> yang diobservasi menunjukkan secara konsisten disetiap CFB boiler yang komersial. Ini adalah hasil langsung dari temperatur pembakaran yang rendah.

#### 3. Efisiensi Pembakaran yang Tinggi [2]

Efisiensi pembakaran pada CFB *boiler* secara umum ada pada *range* 97.5 – 99.5%, sedangkan untuk *bubbling bed* lebih rendah, pada *range* 90 – 98%. Hal-hal ini dibawah ini memberikan kontribusi untuk meningkatkan efisiensi pembakaran CFB *boiler* :

- Pencampuran *gas-solid* yang lebih baik

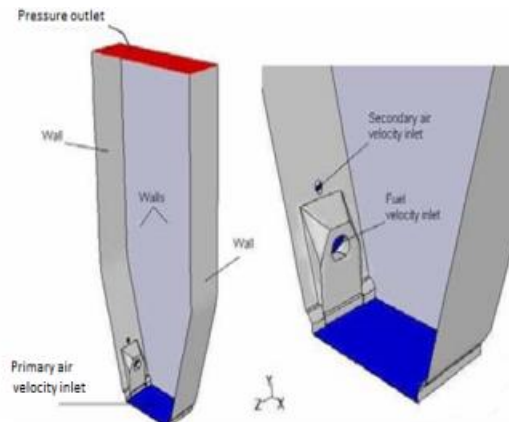


- b. Laju pembakaran yang tinggi

#### 2.2.4 Penelitian oleh Kumar dan Pandey

Pada tahun 2012, Ravindra Kumar dan K.M. Pandey melakukan penelitian yang berjudul “CFD Analysis of Circulating Fluidized Bed Combustion”. Pada jurnal ini, dilakukan analisa pada *circulating fluidized bed combustion* menggunakan *software* FLUENT. Pada penelitian ini membahas mengenai *gas-solid* dengan campuran 2 fasa yang melewati *bed material*. Informasi yang didapatkan berupa analisa dari tekanan dan temperatur dari *fluidized bed* [8].

Penelitian ini menggunakan pembakaran batubara pada *circulating fluidized bed* dan digunakan model turbulen  $k-\epsilon$  *two-phase* untuk mendeskripsikan aliran *gas-solid* sepanjang CFB. Analisa dari pembakaran batubara menggunakan *discrete phase model* (DPM) serta *pre-mixed combustion*. Pada ruang bakar CFB, bahan bakar, udara, dan material *input* lain masuk melalui masing-masing *inlet*. Ukuran dari partikel adalah 5 mm dan kecepatan *fluidizing* sebesar 4-6 m/s. Dari hasil analisis, variasi dari diameter partikel dan kecepatan *superficial*, berpengaruh terhadap distribusi temperatur, tekanan, dan energi turbulen pada area ruang bakar. Temperatur rata-rata yang didapatkan adalah 1370 K [8].



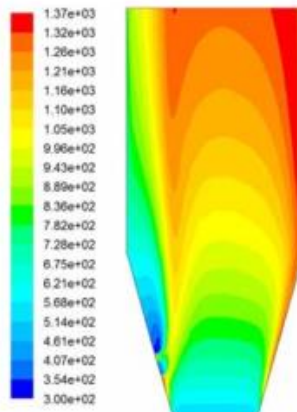
Gambar 2.3 Gambar *Boiler* dalam 3D [8]

*Boundary condition* digunakan untuk menganalisa model tersebut. Pada awalnya, kecepatan partikel *solid* diatur pada nilai minimum untuk *fluidization*, dan kecepatan gas bernilai sama pada seluruh *boiler*. Temperatur pada *primary* dan *secondary air* diatur pada nilai 503K dan 473K. Pada *inlet*, semua kecepatan dan fasa diketahui. Sedangkan pada *outlet*, tekanan diasumsikan sebagai tekanan atmosfer. Berikut ini *boundary condition* yang digunakan pada penelitian ini.

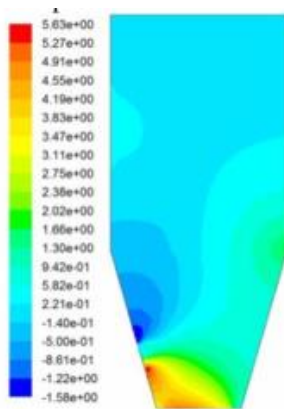
<i>Boundary</i>	<i>Condition</i>
<i>Inlet1</i>	<i>Primary (fluidized) velocity inlet</i>
<i>Inlet2</i>	<i>Secondary velocity inlet</i>
<i>Particle flow</i>	<i>Mass flow rate</i>
<i>Outlet</i>	<i>Pressure-outlet</i>

Pada penelitian ini, dilakukan analisa proses pembakaran dengan kecepatan *fluidizing* sebesar 4 m/s.

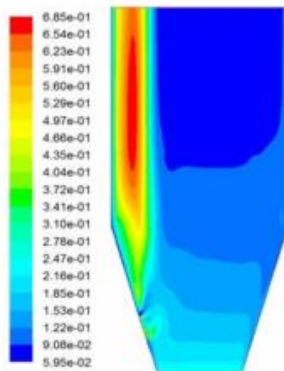
#### PADA FLUIDIZING VELOCITY = 4M/S



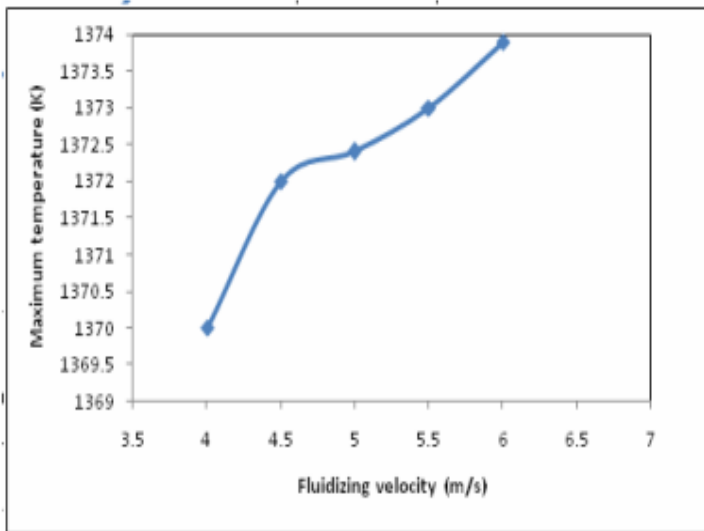
Gambar 2.4 Kontur dari Temperatur Total [8]



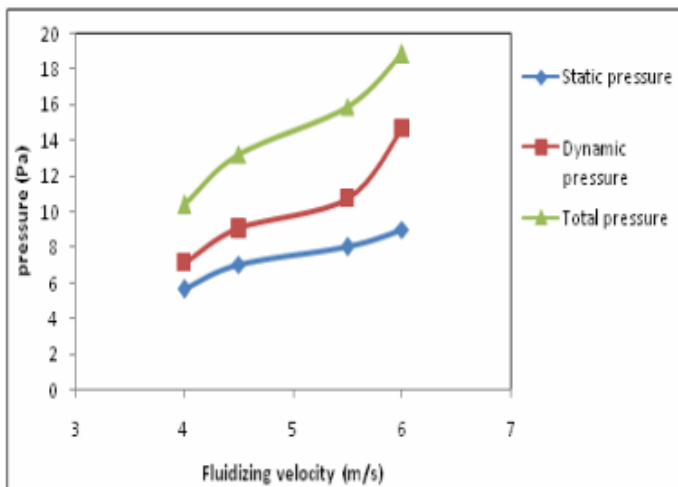
Gambar 2.5 Kontur dari Tekanan Statis [8]



Gambar 2.6 Kontur dari Energi Kinetik Turbulen [8]



Gambar 2.7 Grafik Temperatur versus *Fluidizing Velocity* [8]

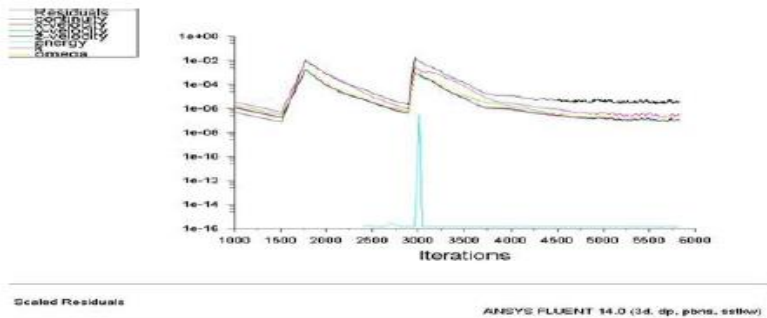


Gambar 2.8 Grafik Tekanan versus *Fluidizing Velocity* [8]

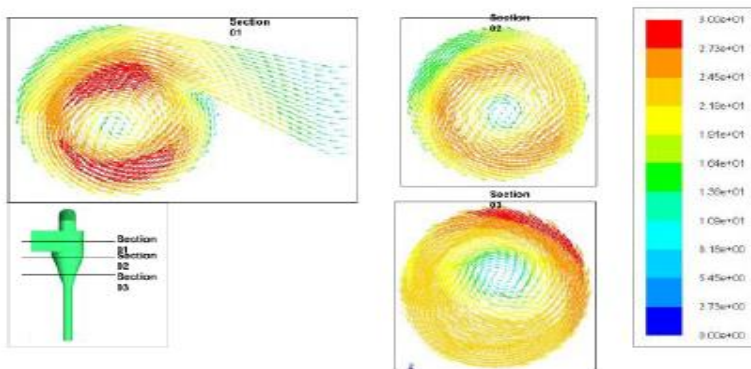
### 2.2.5 Penelitian Terdahulu pada Cyclone

Pada tahun 2015, dilakukan penelitian dengan judul “*CFD Simulation CFB Boiler*” yang dibuat oleh Amol Kinkar, G. M. Dhote dan R.R. Chokkar. Pada jurnal ini dilakukan analisa yang berfokus pada cyclone dari sistem tersebut. *Cyclone* ini dibuat model simulasinya menggunakan ANSYS FLUENT dan dianalisa bagaimana bentuk kontur kecepatan dari aliran didalam *cyclone* tersebut. Pada penelitian ini membahas tentang dimana bagian dari *cyclone* yang rawan terjadi erosi yang bisa dilihat dari kontur kecepatannya. Bila semakin tinggi kecepatannya maka semakin besar kemungkinannya terjadi erosi dan jika terjadi erosi maka performa dari *cyclone* ini juga akan menurun [7].

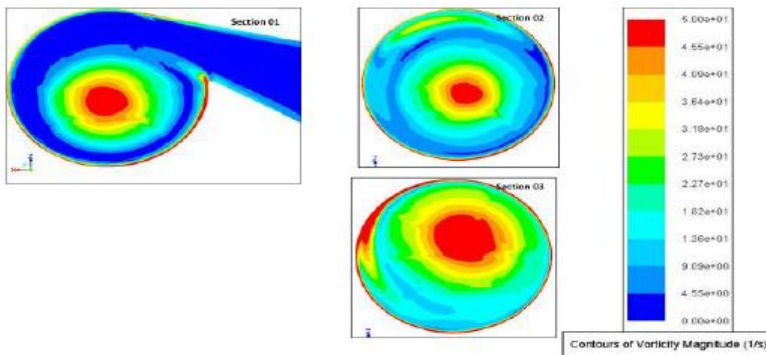
Setelah dilakukan simulasi pada perangkat lunak ANSYS FLUENT telah didapatkan kontur kecepatan dari aliran yang melewati *cyclone*. Berikut adalah hasil simulasi dari FLUENT yang telah dijalankan :



Gambar 2.9 Grafik Konvergensi [7]



Gambar 2.10 *Velocity Magnitude* untuk *Cyclone Separator* [7]



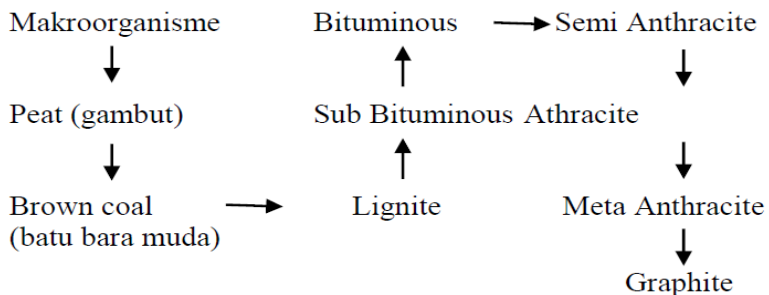
Gambar 2.11 *Vorticity Magnitude* untuk *Cyclone Separator* [7]

### 2.3 Bahan Bakar Batubara

Berbagai penelitian yang telah dilakukan pada batubara bermuara pada suatu simpulan bahwa batu bara merupakan bahan bakar padat yang berasal dari makroorganisme terutama tersusun atas lignin dan selulosa yang mengalami perubahan komposisi susunan atau struktur karena proses biokimia (20omogeny20g20e) pada tekanan dan suhu tertentu dalam rentang waktu yang sangat panjang. Selama proses metamorfosa unsur – unsur O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>

dan S secara berangsur keluar dalam bentuk gas sehingga tertinggal unsur – unsur C dalam prosentase terbesar kemudian berturut – turut O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> dan S serta beberapa unsur lainnya. Secara skematis derajat metamorfosa yang menggambarkan tingkat batu bara tersusun sebagai berikut:

Secara teknis dan ekonomis “*peat*”, *brown coal* dan grafit tidak dianggap sebagai batu bara.



Dengan demikian yang disebut sebagai batu bara mewakili derajat metamorfosa *Lignite*, *Sub Bituminous*, *Bituminous*, *Semi Anthracite* dan *Meta Anthracite*.

### 2.3.1 Klasifikasi Batubara

Batubara dapat diklasifikasikan berdasarkan derajat metamorfosa, nilai komersial dan berdasarkan kegunaan batu bara. Klasifikasi yang disebutkan pertama yang banyak dipergunakan sebagai acuan utama [9].

- **Klasifikasi menurut tingkatannya**

Klasifikasi ini adalah yang terpenting dalam mengklasifikasikan batubara. Batu bara diklasifikasikan menurut derajat metamorfosanya dalam bentuk alamiah. Klasifikasi yang di ambil dari ASTM adalah berdasarkan atas prosentase karbon tetap (*fixed carbon*) dan panas pembakaran (*heating value*) pada kondisi batubara bebas bahan mineral (*mineral matter free*). Untuk batubara dengan tingkatan yang lebih tinggi diklasifikasikan menurut karbon tetapnya pada keadaan kering, sementara untuk

tingkatan yang lebih rendah, didasarkan pada nilai kalor dimana batu bara masih mengandung kebasahan (*moisture*).

- **Meta Anthracite** : adalah batu bara dengan kadar karbon tinggi yang mempunyai sifat mendekati grafit dalam struktur dan komposisinya. Biasanya sukar untuk dinyalakan dan dibakar.

- **Anthracite** : juga disebut sebagai batu bara keras, karena kekerasannya, padat dan hitam mengkilat. Agak sukar untuk dinyalakan dan terbakar dengan nyala api pendek, tanpa asap, dan berwarna biru. Anthracite terutama digunakan untuk pemanas ruangan dan sebagian bahan dari karbon. Pada 22omogeny besi dan baja digunakan dengan dicampur bituminous untuk pembuatan coke, sebagai pelapis catakan, pemanas dan sebagai campuran coke pada proses pengecoran. Selain daripada itu juga digunakan pada berbagai macam tujuan dimana nyala api yang bersih dan steady diperlukan.

- **Semi Anthracite** : padat tapi agak lemah 22omogeny22g anthracite, terbakar dengan nyala api pendek, bersih dan kebiru – biruan. Penggunaannya hampir sama dengan *anthracite*.

- **Low Volatile Bituminous Coal** : berwarna hitam keabu – abuan, mempunyai struktur yang bulat-bulat dan mudah pecah dalam pengangkutan. Terbakar dengan nyala api yang pendek dan tidak berasap. Digunakan sebagai campuran *higher volatile bituminous coal* dalam pembuatan coke, pemanasan ruangan. *Low volatile bituminous coal* tidak boleh dikarbonasikan sendiri pada oven yang berbentuk selokan karena dapat berkembang dan merusak dinding oven.

- **Medium Volatile Bituminous Coal** : merupakan batu bara yang mempunyai sifat antara low dan high volatile bituminous coal sehingga karakteristik berada antara keduanya. Sebagian mempunyai sifat agak lunak dan mudah pecah, sebagian lainnya mempunyai sifat keras dan tidak pecah dalam pengangkutan. Berasap apabila dibakar dengan cara yang kurang baik. Coke yang dibuat dari batubara ini mempunyai kekuatan yang baik sekali.

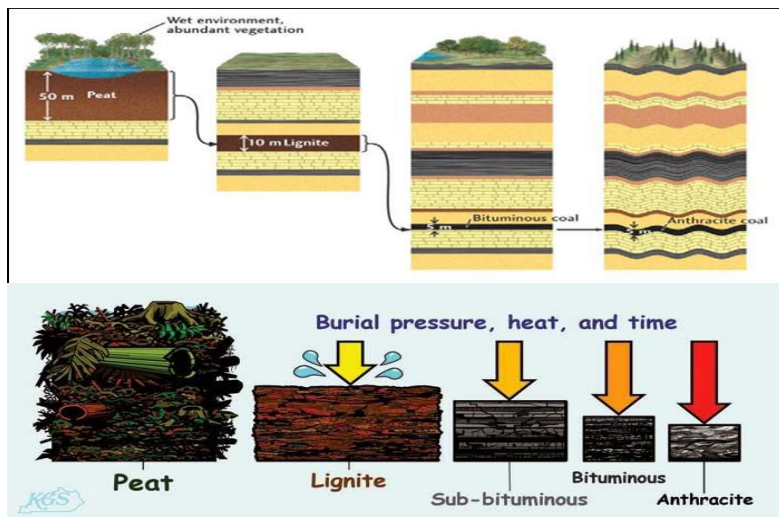
- **High Volatile Bituminous Coal** : mempunyai struktur yang 22omogeny dengan garis – garis mengkilat, bersifat keras dan tidak



mudah pecah dalam pengangkutan. Berasap apabila tidak dibakar dengan baik. Mempunyai kadar *moisture* dan oksigen yang cukup tinggi. Digunakan dalam pembuatan coke dengan dicampur batubara dengan mutu yang lebih baik.

- **Sub Bituminous Coal** : mempunyai struktur yang homogeny, kandungan kelembapannya tinggi, dan mudah pecah apabila ditempatkan di udara terbuka karena penyusutan sebagai akibat dari penguapan kelembapannya. Penggunaannya terutama untuk pemanas (bahan bakar ketel uap).

- **Lignite** : berwarna coklat kehitaman, mempunyai kadar *moisture* 30 – 40 % dan panas pembakaran yang rendah. Seperti *sub bituminous* mempunyai kecenderungan untuk pecah selama pengeringan dengan udara. Lignite digunakan untuk bahan bakar ketel uap dan dapat dibakar dengan menggunakan tungku bakar maupun dari bentuk lembut (*pulverized form*).

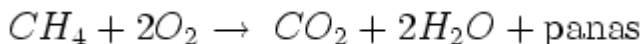


Gambar 2.12 Klasifikasi Batubara [9]

## 2.4 Pembakaran

Pembakaran adalah suatu runtutan reaksi kimia antara suatu bahan bakar dan suatu oksidan, disertai dengan produksi panas yang disertai cahaya dalam bentuk pendar atau api. Dalam suatu reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan zat pengoksidasi, dan produknya adalah senyawa dari tiap elemen dalam bahan bakar dengan zat pengoksidasi.

Contoh :



Tipe pembakaran ada 2 yaitu :

### - Pembakaran sempurna

Pada pembakaran sempurna, reaktan terbakar dengan oksigen menghasilkan beberapa produk. Ketika hidrokarbon terbakar dengan oksigen, maka reaksi utama akan menghasilkan karbon dioksida dan air. Ketika elemen dibakar, maka produk yang dihasilkan biasanya juga berupa oksida. Karbon dibakar menghasilkan karbon dioksida, sulfur dibakar menghasilkan sulfur dioksida, dan besi dibakar menghasilkan besi (III) oksida. Nitrogen tidak dianggap sebagai komponen yang bisa terbakar jika oksigen dipakai sebagai agen pengoksidasi, namun nitrogen oksida NO<sub>x</sub> dalam jumlah kecil biasanya akan terbentuk.

Jumlah udara yang diperlukan untuk pembakaran sempurna disebut udara teoritis. Namun, pada prakteknya digunakan jumlah 2-3 kali jumlah udara teoritis.

### - Pembakaran tidak sempurna

Pembakaran tak sempurna dihasilkan bila tidak ada oksigen yang cukup untuk membakar bahan bakar sepenuhnya menjadi karbon dioksida dan air. Pada banyak bahan bakar, seperti minyak diesel, batu bara, dan kayu, pirolisis muncul sebelum pembakaran. Pada pembakaran tak sempurna, produk pirolisis tidak terbakar dan mengkontaminasi asap dengan partikulat berbahaya, misalnya oksidasi sebagian etanol menghasilkan asetaldehida yang berbahaya, begitu juga dengan oksidasi sebagian karbon yang menghasilkan karbon monoksida yang beracun.

Kualitas pembakaran dapat ditingkatkan dengan desain alat pembakaran, seperti pembakar minyak dan mesin pembakaran dalam. Perbaikan lebih lanjut mencakup alat katalitik pasca pembakaran (seperti konverter katalitik). Beberapa alat-alat ini biasanya dibutuhkan oleh banyak mobil / kendaraan di berbagai negara untuk memenuhi aturan lingkungan negaranya mengenai standar emisi. Derajat pembakaran dapat diukur dan dianalisis dengan peralatan uji. Kontraktor HVAC dan insinyur menggunakan analiser pembakaran.

### 2.4.1 Reaksi Pembakaran

Reaksi pembakaran dari bahan bakar, dapat terjadi jika syarat-syarat kimia berikut tercapai:

- Terjadi kombinasi yang sempurna antara dua atau lebih reaktan berdasarkan rasio stoikiometrik.
- Massa elemen reaktan harus sama dengan massa hasil reaksi (hukum kekekalan massa)
- Senyawa kimia terbentuk dari elemen-elemen kombinasi dengan hubungan massa yang tetap.
- Formasi dari senyawa yang menghasilkan panas (reaksi eksotermik) ataupun yang membutuhkan panas (reaksi endotermik), berdasarkan atas perubahan energi bebas dari reaksi. Tabel berikut menjelaskan bentuk reaksi kimia pada berbagai jenis bahan bakar.

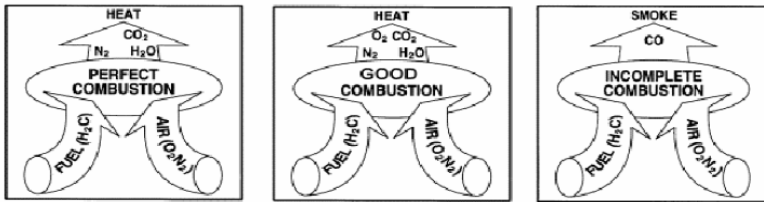
Tabel 2.4 Bentuk Reaksi Kimia Bahan Bakar [10]

Combustible	Molecular Weight	Reaction	Heat Release (Btu/lb)
Carbon	12	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	14,100
Hydrogen	2	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	61,000
Sulfur	32	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	4,000
Hydrogen sulfide	34	$H_2S + 1.5O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$	7,100
Methane	16	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	23,900
Ethane	30	$C_2H_6 + 3.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	22,300
Propane	44	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	21,500
Butane	58	$C_4H_{10} + 6.5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$	21,300
Pentane	72	$C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$	22,000

Source: *Combustion*, edited by Joseph G. Singer, © 1991. Used by permission from Combustion Engineering, Inc.

### 2.4.2 Pembakaran Tiga T

Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan “tiga T” pembakaran yaitu (1) *Temperature* / suhu yang cukup tinggi untuk menyalakan dan menjaga penyalaan bahan bakar, (2) *Turbulence*/ Turbulensi atau pencampuran oksigen dan bahan bakar yang baik, dan (3) *Time*/ Waktu yang cukup untuk pembakaran yang sempurna. Bahan bakar yang umum digunakan seperti gas alam dan propan biasanya terdiri dari karbon dan hidrogen. Uap air merupakan produk samping pembakaran hidrogen, yang dapat mengambil panas dari gas buang, yang mungkin dapat digunakan untuk transfer panas lebih lanjut. Gas alam mengandung lebih banyak hidrogen dan lebih sedikit karbon per kg daripada bahan bakar minyak, sehingga akan memproduksi lebih banyak uap air. Sebagai akibatnya, akan lebih banyak panas yang terbawa pada pembuangan saat membakar gas alam. Terlalu banyak, atau terlalu sedikit nya bahan bakar pada jumlah udara pembakaran tertentu, dapat mengakibatkan tidak terbakarnya bahan bakar dan terbentuknya karbon monoksida. Jumlah O<sub>2</sub> tertentu diperlukan untuk pembakaran yang sempurna dengan tambahan sejumlah udara (udara berlebih) diperlukan untuk menjamin pembakaran yang sempurna. Walau demikian, terlalu banyak udara berlebih akan mengakibatkan kehilangan panas dan efisiensi. Tidak seluruh bahan bakar diubah menjadi panas dan diserap oleh peralatan pembangkit. Biasanya seluruh hidrogen dalam bahan bakar terbakar. Saat ini, hampir seluruh bahan bakar untuk boiler, karena dibatasi oleh standar polusi, sudah mengandung sedikit atau tanpa sulfur. Sehingga tantangan utama dalam efisiensi pembakaran adalah mengarah ke karbon yang tidak terbakar (dalam abu atau gas yang tidak terbakar sempurna), yang masih menghasilkan CO selain CO<sub>2</sub>.



Gambar 2.13 Pembakaran yang Sempurna, Baik dan Tidak Sempurna [10]

### 2.4.3 Perhitungan Stoikiometri Pembakaran

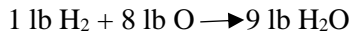
Dari data batubara yang digunakan di PLTU Air Anyir yang dapat dilihat pada tabel 2.3 akan dipilih data pada pengecekan 1 sebagai data perhitungan karena memiliki nilai kalor tertinggi.

- Reaksi pembakaran antara karbon dan oksigen  
 $1 \text{ lb C} + 2,67 \text{ lb O}_2 \rightarrow 3,67 \text{ lb CO}_2$

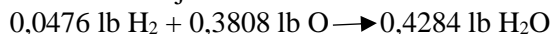
Karena batubara yang digunakan mengandung 69,49% C maka persamaan reaksi di atas menjadi :



- Reaksi pembakaran antara hydrogen dengan oksigen

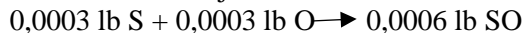


Karena batubara yang digunakan mengandung 4,76% H maka persamaan reaksi di atas menjadi :



- Reaksi pembakaran antara sulfur dengan oksigen  
 $1 \text{ lb S} + 1 \text{ lb O} \rightarrow 2 \text{ lb SO}$

Karena batubara yang digunakan mengandung 0,3% S maka persamaan reaksi di atas menjadi :



Jumlah oksigen dari ketiga persamaan tersebut adalah  $1,855 + 0,3808 + 0,0003 = 2,2361$ . Batubara yang digunakan sendiri mengandung 23,922%. Maka oksigen yang diperlukan dari udara pembakaran adalah  $2,2361 - 0,239 = 1,9971$ . Berat udara teoritis =  $1,9971 (1 \text{ lb O}_2 + 3,76 \text{ lb N}_2) = 1,9971 \text{ lb O}_2 + 7,5 \text{ lb N}_2$

= 9,506 lb udara. Maka kebutuhan udara untuk kondisi stoikiometri adalah 9,506 lb udara/lb batubara.

## 2.5 Numerical Model

*Computational Fluid Dynamics* adalah salah satu metode yang bisa digunakan untuk menyimulasikan bagaimana proses pembakaran yang terjadi didalam *boiler*. Untuk menyimulasikan proses pembakaran yang terjadi didalam *boiler* ini kita memerlukan data-data operasi dari boiler yang ada di PLTU Air Anyir Bangka. Selain itu tahap pertama adalah kita harus membuat geometri dari *boiler* dan juga *cyclone* yang ada di lapangan. Untuk membuat geometri *boiler* dan *cyclone* bisa dibuat dengan menggunakan *software* GAMBIT dan untuk menjalankan simulasi bisa menggunakan *software* ANSYS, khususnya ANSYS 16.2 yang merupakan update terbaru dari *software* ANSYS. ANSYS adalah sebuah *software* analisis elemen hingga (*finite element*), bisa dipakai untuk melakukan analisis mekanika benda tegar, analisis fluida, dan analisis perpindahan panas.

Untuk menyelesaikan sebuah persoalan, *software* ANSYS menggunakan solusi secara pendekatan matematis. Untuk mendapatkan hasil yang konvergen *software* ANSYS akan terus mengiterasi data-data yang diberikan agar bisa mendapatkan hasil yang diinginkan. ANSYS baru akan berhenti jika grafik yang didapatkan sudah cukup konvergen atau iterasi telah selesai dilakukan, ini merupakan kebijakan pengguna. Berikut akan dijelaskan beberapa persamaan yang digunakan untuk mendapatkan solusi pendekatan yang diharapkan.

Simulasi numerik proses pembakaran dalam ruang bakar sebuah generator uap PLTU merupakan salah satu metode untuk mengetahui fenomena fisik yang terjadi di dalam ruang bakar. Oleh karena, itu dibutuhkan persamaan-persamaan fisik yang mengatur proses yang terjadi di dalam ruang bakar yang antara lain:

### 1. Persamaan Kekekalan Massa (Kontinuitas) [11]

Persamaan kontinuitas yang diterapkan adalah:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2.1)$$

Persamaan diatas adalah persamaan umum kontinuitas untuk aliran *incompressible* maupun *compressible*.  $\dot{m}$  adalah sumber massa (*mass source*) dari fasa diskrit ataupun reaksi spesies.

## 2. Persamaan Kekekalan Momentum [11]

Persamaan umum kekekalan momentum dalam arah  $i$  untuk fasa kontinu diberikan dalam persamaan:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.2)$$

Dengan  $p$  adalah tekanan statis,  $\tau_{ij}$  adalah tensor tegangan geser,  $\rho g_i$  dan  $F_i$  adalah pengaruh gaya gravitasi dan gaya eksternal atau gaya luar.

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.3)$$

Dengan  $\mu$  adalah viskositas molekular dan  $\tau_{ij}$  adalah tensor satuan.

## 3. Persamaan Kekekalan Energi [11]

Persamaan umum kekekalan energi dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v} (\rho E + p)] = -\vec{v} \cdot (\sum_j h_j J_j) + S_h \quad (2.4)$$

Dimana  $J_j$  adalah fluks difusi spesies,  $h_j$  adalah entalpi spesies dan  $p$  adalah tekanan. Suku  $S_h$  adalah sumber energi yang berasal dari reaksi, radiasi, perpindahan panas antara fasa kontinu dengan fasa diskrit, dan fluks energi. Pengaruh energi potensial dan kinetik diwakili oleh  $E$  pada suku kedua ruas kiri.

Persamaan-persamaan tersebut selanjutnya akan diselesaikan secara numerik dengan bantuan perangkat lunak.

### 2.6 Air – Fuel Ratio

Pada sebuah boiler diperlukan 2 komponen utama agar bisa terjadi pembakaran didalam ruang bakar tersebut. Agar bisa terjadi pembakaran diperlukan udara dan juga yang paling penting adalah bahan bakar, kedua zat ini akan bereaksi didalam ruang bakar sehingga pembakaran bisa terjadi. Pembakaran ini berguna untuk merubah fase dari air menjadi uap sehingga berikutnya uap ini akan digunakan untuk menggerakkan turbin. Bahan bakar yang digunakan untuk pembakaran *furnace* ini adalah batu bara dengan menggunakan sistem *circulated fluidized bed*.

Cara mencari *air-fuel ratio* adalah dengan menggunakan rumus :

$$AFR = \frac{mudara}{mbahan bakar} \quad (2.5)$$

M udara yang disebutkan diatas adalah total udara yang dimasukkan kedalam *furnace* tersebut, ini adalah penjumlahan dari *primary air* dan *secondary air*. Pada *furnace* PLTU Air Anyir di Bangka memiliki 2 jalur masuk *primary air* dan 16 jalur masuk *secondary air*, yang dibagi pada bagian depan *furnace* dan 8 bagian belakang *furnace*. Bahan bakar yang dimasukkan berupa batu bara melalui 3 jalur masuk ke dalam *furnace*. Dalam *furnace* terjadi pembakaran yang dibantu oleh pasir yang berfungsi sebagai *fluidized bed*, fungsinya adalah sebagai media pemanas untuk memanaskan air.

Dua parameter yang sering dipakai untuk memberikan kuantifikasi jumlah bahan bakar dan udara di dalam sebuah proses pembakaran tertentu adalah rasio udara- bahan bakar dan kebalikannya, rasio bahan bakar-udara. Rasio udara- bahan bakar singkatnya adalah rasio jumlah udara didalam sebuah reaksi terhadap jumlah bahan bakar. Rasio ini dapat dituliskan dengan basis molar (mol udara dibagi dengan mol bahan bakar) atau dengan basis massa (massa udara dibagi dengan massa bahan bakar). Konversi diantara kedua ini dilakukan menggunakan berat molekul dari udara, Mudara, dan bahan bakar, Mbahan bakar. Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stoikiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar.

Pengaruh *AFR* sangat berpengaruh terhadap panjang nyala api. Panjang nyala api berkebalikan dengan *AFR* yakni *AFR* meningkat maka panjang nyala api menurun. Hal ini juga sesuai dengan persamaan panjang nyala api yang diusulkan oleh Rokke. Persamaan Rokke menunjukkan korelasi antara panjang nyala



yang sebanding dengan fraksi massa bahan bakar. Semakin turun nilai *AFR* berarti fraksi massa bahan bakar semakin tinggi sehingga panjang nyala api juga meningkat dan bahan bakar semakin banyak yang tidak terbakar.

## 2.7 *Excess Air*

Pembakaran stoikiometrik adalah pembakaran ideal secara teoritis. Dalam praktek pembakaran dengan kondisi stokiometrik jarang atau tak mungkin ditemukan untuk pembakaran normal. Untuk mendapatkan pembakaran sempurna dimana bahan bakar semuanya habis terbakar, maka udara pembakaran yang dipasok ke ruang bakar lebih dari kebutuhan teoritis. Kelebihan udara tersebut disebut *excess air*. Besarnya *excess air* dapat dihitung berdasarkan data pengukuran CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> dalam gas buang.

*Excess air* dihitung dengan formula berikut :

$$\text{Excess air (E)} = \{378 / \{100 - (\alpha + \omega)\} / \omega\} - 3.78 \quad (2.6)$$

Keterangan :

E adalah *excess air* (%)

$\alpha$  adalah konsentrasi CO<sub>2</sub> pada gas buang (%)

$\omega$  adalah konsentrasi O<sub>2</sub> pada gas buang (%)

*Excess air* dapat juga dihitung dengan formula berikut :

$$\text{Excess air (E)} = \{(\text{CO}_2 \text{ stokiometrik} / \text{CO}_2 \text{ aktual}) - 1\} \times 100 \% \quad (2.7)$$

Dengan CO<sub>2</sub> stokiometrik adalah volume CO<sub>2</sub> stokiometrik ( $\alpha$ ) dalam *flue gas* kering

- *Natural gas* dan *producer gas*; CO<sub>2</sub> stokiometrik:  $11 < \alpha < 12 \%$ .
- *Commercial* butane dan propane: CO<sub>2</sub> stokiometrik:  $\alpha = 14 \%$ .
- *Fuels*; CO<sub>2</sub> stokiometrik:  $15 < \alpha < 16 \%$ .
- *Marketed coal*; CO<sub>2</sub> stokiometrik:  $18 < \alpha < 20 \%$ .

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

Metode penelitian yang akan digunakan adalah dengan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yaitu *software* ANSYS FLUENT 16.2 untuk analisa pembakarannya dan pemodelan *boiler* serta *cyclone*.

#### **3.1 Objek Penelitian**

Objek pada penelitian kali ini adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Air Anyir yang berlokasi di Pulau Bangka. PLTU ini berkapasitas 2 X 30 MW dengan bahan bakar batubara. *Boiler* yang ada di PLTU Air Anyir berjenis *Circulating Fluidized Bed* (CFB) *Boiler*. Didalam boiler terdapat 3 jenis fase yang bekerja yaitu batubara, udara dan terakhir pasir yang berfungsi sebagai media panas atau *fluidized bed*. Jika tidak ada pasir didalam boiler tipe CFB maka pembakaran tidak akan terjadi secara sempurna dan pembakaran tidak akan terjadi secara *uniform*. Pasir inilah yang membedakan *boiler* tipe CFB dari *boiler* jenis lainnya.

#### **3.2 Tahapan Penelitian**

Dalam melakukan penelitian dan simulasi CFD mengenai *boiler* ini, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan, antara lain :

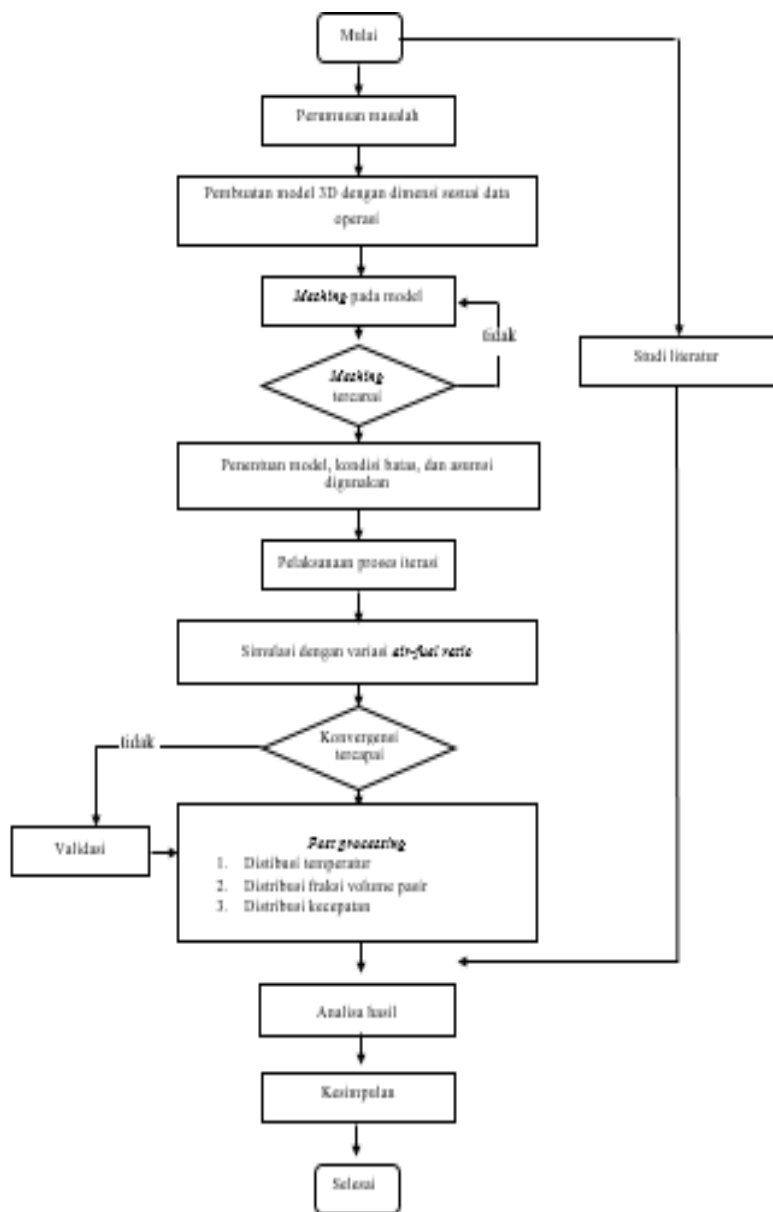
1. Studi kasus permasalahan, yaitu mengenai kemampuan dari *boiler* untuk mendapatkan karakteristik *fluidized* dan karakteristik pembakaran pada saat proses pembakaran dilakukan. Selain itu, permasalahan mengenai erosi pada *boiler* dan *cyclone* juga akan dianalisa berdasarkan hasil dari simulasi yang dilakukan.
2. Studi literatur, yakni untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dibahas, dilakukan studi literatur yang berkaitan dengan proses operasional maupun pembakaran di *boiler* serta studi literatur mengenai simulasi pembakaran batubara pada *boiler*. Studi literatur

diperoleh dari *e-book*, jurnal, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik permasalahan.

3. Pengumpulan dan pengolahan data aktual sebelum melakukan penelitian, diperlukan adanya data acuan simulasi dari sistem yang akan ditinjau.
4. Pemodelan dan simulasi, yaitu diawali dengan *pre-processing* membuat geometri dan penentuan domain dari sistem pembakaran di *boiler* dengan desain yang telah ditentukan menggunakan software Gambit 2.4.6.
5. Selanjutnya, dilakukan *processing* berupa proses simulasi dan iterasi dari domain sistem yang telah dibuat.
6. Dan pada akhir simulasi, dilakukan *post-processing* dengan menampilkan hasil simulasi berupa distribusi temperatur, tekanan, kecepatan, serta distribusi pasir. Untuk *processing* dan *post-processing* digunakan software ANSYS FLUENT 16.2.

### 3.3 Flowchart Penelitian

Suatu kerangka atau diagram alir (*flowchart*) dari tahapan penelitian dapat mempermudah proses penelitian dan simulasi yang akan dilakukan, menggambarkan *flowchart* dari tahapan penelitian mengenai simulasi pembakaran batubara *circulated fluidized bed boiler*.



### 3.4 Tahap Pemodelan dan Simulasi

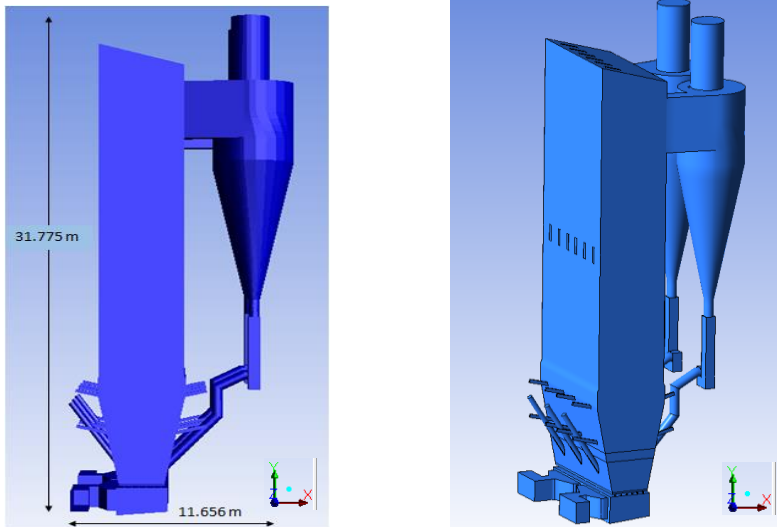
Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak CFD ANSYS FLUENT 16.2. Tahap utama pemodelan dan simulasi ini ada 3, yaitu *pre-processing*, *processing* dan *post-processing*. Penjelasan masing-masing tahapan akan dijelaskan pada anak sub-bab berikut:

#### 3.4.1 *Pre-processing*

*Pre-processing* merupakan tahap awal dari simulasi numerik. Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan sebagai berikut:

##### 1. Pembuatan Geometri Boiler

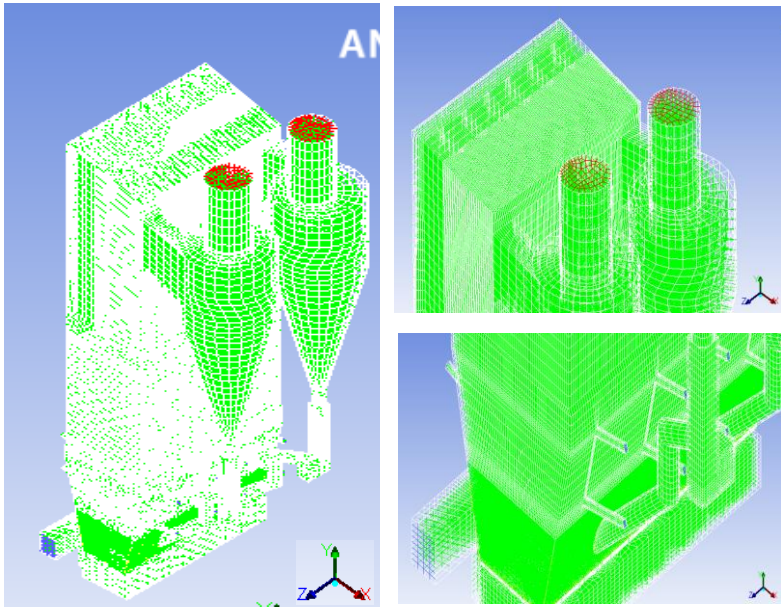
Geometri boiler dibuat menggunakan perangkat lunak GAMBIT 2.4.6 berdasarkan dimensi yang telah diberikan oleh pihak PLTU Air Anyir.



Gambar 3.1 *Boiler dan Cyclone* PLTU Air Anyir Bangka Tampak Samping dan Iso-metri pada FLUENT

## 2. *Meshing*

*Meshing* adalah proses pemecahan domain menjadi volume yang lebih kecil. Hal ini dilakukan untuk memudahkan diskritisasi domain aliran dan menerapkan persamaan pengendali pada domain aliran. Untuk mendapatkan simulasi yang akurat maka pemilihan *meshing* pada sebuah geometri dibuat mengikuti prediksi perubahan pola aliran yang terjadi. Gambar *meshing boiler* dan *cyclone* PLTU Air Anyir Bangka bisa dilihat pada Gambar 3.2. Jumlah nodal yang dibuat dalam *meshing* tersebut sejumlah 2.273.622 nodal.



Gambar 3.2 *Meshing Boiler* PLTU Air Anyir Bangka

## 3. Penentuan Domain Pemodelan

Pembuatan domain pemodelan terdiri dari *mass flow inlet* untuk *primary & secondary air nozzle* dan *coal injection*. Penjelasannya adalah bahwa *primary & secondary air nozzle* dan

*coal injection* sebagai *mass flow inlet* adalah data yang akan dimasukkan pada saat processing di perangkat lunak ANSYS FLUENT adalah data *mass flow inlet* yang diberikan oleh PLTU Air Anyir Bangka.

### 3.4.2 Processing

*Processing* merupakan proses pengaturan pada perangkat lunak CFD komersial untuk mensimulasikan proses pembakaran yang terjadi pada boiler. Berikut ini beberapa pengaturan pada perangkat lunak CFD komersial yang akan digunakan pada penelitian ini:

#### 1. Model

Secara umum model yang digunakan untuk menyelesaikan pemodelan ini dapat dilihat pada table 3.1.

Tabel 3.1 *Models* yang digunakan dalam Simulasi CFB Boiler PLTU Air Anyir Bangka

Model	Keterangan	Dasar Pemilihan
<i>Multiphase</i>	Eulerian	Dapat mendefinisikan propertis dari ketiga fase dan interaksi ketiganya
<i>Energy Equation</i>	<i>On</i>	Diperlukan hasil temperatur pembakaran
<i>Viscous</i>	<i>k-ε Standar</i>	Dapat menyelesaikan permasalahan <i>heating</i> , <i>buoyancy</i> dan <i>combustion</i> .
<i>Radiation</i>	<i>Off</i>	Penelitian tidak mengarah pada perpindahan panas
<i>Heat Exchanger</i>	<i>Off</i>	<i>Heat Exchanger</i> diabaikan



<i>Species</i>	<i>Species transport, Reaction</i>	<u>Karena spesies kimia yang diinjeksikan mempunyai reaksi kimia (pembakaran) yang telah didefinisikan pada material yang digunakan [4]</u>
<i>Discrete Phase Model</i>	<i>On</i>	<u>Mendefinisikan injeksi untuk inlet batubara [4]</u>
<i>Solidification</i>	<i>Off</i>	<u>Tidak diperlukan</u>
<i>Acoustic</i>	<i>Off</i>	<u>Tidak diperlukan</u>
<i>Eulerian Wall Film</i>	<i>Off</i>	<u>Tidak diperlukan</u>

Dari Tabel 3.1 diketahui bahwa *species model* yang digunakan adalah *species transport, reaction* untuk *mixture material* digunakan sesuai dengan *coal analysis* data operasi PLTU Air Anyir yang ditampilkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Ultimate Analysis* dan *Proximate Analysis* Batubara yang Digunakan PLTU Air Anyir

<i>Ultimate Analysis</i>			<i>Proximate Analysis</i>		
<i>Material</i>	<i>Unit</i>	<i>As Received (AR)</i>	<i>Material</i>	<i>Unit</i>	<i>Dry Ash Free (DAF)</i>
<i>Volatile</i>	% wt	34,5	Karbon	% wt	70,49
<i>Fixed Carbon</i>	% wt	32,3	Hidrogen	% wt	3,35
<i>Ash</i>	% wt	4,6	Oksigen	% wt	23,215
<i>Total Moisture</i>	% wt	28,6	Nitrogen	% wt	1,147
			Sulfur	% wt	1,8

## 2. Material

*Properties* material batubara yang digunakan dalam simulasi dapat dilihat pada Tabel 3.3, sedangkan untuk *properties* material pasir dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.3 *Properties* Batubara CFB Boiler PLTU Air Anyir

<b><i>Properties</i></b>	<b><i>Nilai</i></b>	<b><i>Sumber</i></b>
<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	1400	FLUENT <i>database</i>
<i>Cp</i> (J/kg.K)	1500	FLUENT <i>database</i>
<i>Vaporation Temperature</i> (K)	400	FLUENT <i>database</i>
<i>Volatile Component Fraction</i> (%)	34,5	Data perusahaan ( <i>supplier</i> batubara)
<i>Binary diffusivity</i> (m <sup>2</sup> /s)	0,0005	FLUENT <i>database</i>
<i>Sweling coefficient</i>	2	FLUENT <i>database</i>
<i>Combustible fraction</i> (%)	32,3	Data perusahaan ( <i>supplier</i> batubara)
<i>React heat fraction absorbed by solid</i>	30	FLUENT <i>database</i>
<i>Devolatilization model</i> (1/s)	50	FLUENT <i>database</i>
<i>Combustion model</i>	<i>Multiple surface reactions</i>	Reaksi kimia yang disimulasikan meliputi reaksi volumetric dan particle surface

Tabel 3.4 *Properties* Pasir pada Bed Material CFB Boiler PLTU Air Anyir

<b><i>Properties</i></b>	<b><i>Nilai</i></b>	<b><i>Sumber</i></b>
<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	2500	Data perusahaan
<i>Viscosity</i> (kg/m-s)	0,00103	FLUENT <i>database</i>
<i>Diameter partikel</i> (m)	0,0002	Data perusahaan

### 3. *Boundary Conditions*

Untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan *boiler* yang ada di PLTU Air Anyir Bangka maka perlu dimasukkan nilai-nilai yang sesuai dengan data yang didapatkan dari perusahaan. Data inilah yang disebut *boundary condition*, yang berarti kondisi batas seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.5. Data yang digunakan adalah data pada saat pembangkit bekerja dengan beban 68,67% MCR (*Maximum Continous Rate*).

Tabel 3.5 *Boundary Conditions* yang digunakan dalam Permodelan

Nama <i>Boundary Condition</i>	Tipe	Fase	Nilai input
<i>Primary air</i>	<i>Mass flow inlet</i>	Udara	$\dot{m}$ : divariasikan T : 464 K P <sub>gage</sub> : 7,5 kPa
<i>Secondary air</i>	<i>Mass flow inlet</i>	Udara	$\dot{m}$ : divariasikan T : 534 K P <sub>gage</sub> : 0,9 kPa
<i>Coal inlet</i>	<i>Mass flow inlet</i>	<i>Coal</i>	$\dot{m}$ : 1,852 kg/s $\dot{m}$ : 1,852 kg/s $\dot{m}$ : 1,852 kg/s
		Udara	$\dot{m}$ : 0,52 kg/s $\dot{m}$ : 0,52 kg/s $\dot{m}$ : 0,52 kg/s
<i>Outlet</i>	<i>Pressure-outlet</i>	<i>Mixture</i>	P <sub>gage</sub> : -1,1 kPa

#### 4. Variasi Data

Dalam simulasi numerik ini dilakukan pada 95,33% MCR (*Maximum Continous Rate*). Variasi dilakukan pada rasio antara udara dan batubara yang masuk dengan jumlah batubara yang konstan seperti pada Tabel 3.6. Pada *air – fuel ratio* (4,72) juga digunakan sebagai acuan validasi terhadap kondisi aktual di lapangan. Data yang dijaga tetap adalah nilai dari *primary air*, sedangkan yang diubah adalah nilai *secondary air* yang nantinya akan berakibat pada berubahnya nilai AFR dari simulasi tersebut.

Tabel 3.6 Variasi Air – Fuel Ratio (AFR)

<i>Air – Fuel Ratio (AFR)</i>	$\dot{m}$ Total Udara (kg/s)	$\dot{m}$ <i>primary air</i> (kg/s)	$\dot{m}$ <i>secondary air</i> (kg/s)	$\dot{m}$ udara coal (kg/s)	$\dot{m}$ Batubara (kg/s)
3,12	17,33	12,33	3,445	1,56	5,556
4,72	26,22		12,334		
6,00	33,34		19,446		
9,00	50,00		36,114		

#### 5. Operating Conditions

*Operating Conditions* merupakan perkiraan tekanan daerah operasi boiler. Sebagai acuan diambil pada inlet primary air dengan tekanan 7500 Pa.

#### 6. Initialize

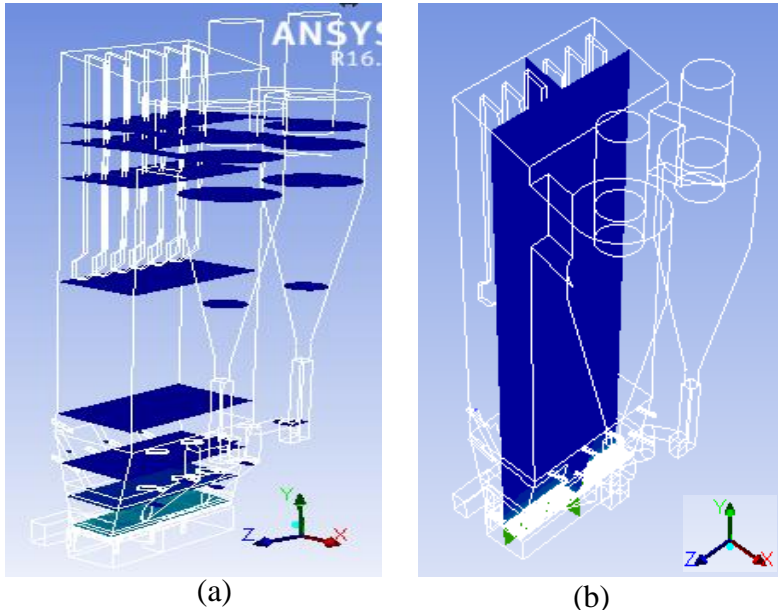
*Initialize* merupakan tebakan awal sebelum melakukan perhitungan sehingga akan memudahkan dalam mencapai konvergen. Tebakan dapat dimulai dari kondisi batas sisi masuk, sisi keluar, semua zona dan lain-lain. *Initialize* yang digunakan adalah *standard initialize*.

## **7. *Monitoring Residual***

Monitor Residual adalah tahap penyelesaian masalah berupa proses iterasi hingga mencapai harga konvergen yang diinginkan. Harga konvergen ditetapkan sebesar  $10^{-3}$  artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga di bawah  $10^{-3}$ . Namun jika nilai konvergen tetap tidak tercapai maka untuk proses validasi dapat dilakukan pengambilan data pada iterasi tertentu dimana pada iterasi tersebut memiliki nilai parameter yang hampir sama dengan data operasi aktual. Dalam kasus ini, data yang bisa digunakan sebagai validasi adalah data pada variasi keempat yaitu dengan AFR sebesar 4,727.

### **3.4.3 *Post-processing***

Merupakan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif (kontur) dan data kuantitatif berupa grafik maupun tabel data. Pada penelitian ini penganalisaan pada karakteristik pembakaran dilakukan terhadap distribusi Temperature (kontur dan grafik), distribusi kecepatan (kontur), distribusi gas buang CO<sub>2</sub>, Nox dan CO (kontur dan grafik) selain itu ada juga kontur dari volume fraksi pasir yang ada didalam boiler.



Gambar 3.3 (a) *Plane* yang Diambil untuk Setiap Elevasi Boiler.  
 (b) *Plane x* dan *Plane z* untuk Mengambil Tampilan Kontur

Gambar 3.3 (a) menunjukkan bidang-bidang yang akan diambil datanya untuk setiap ketinggian *boiler*. Berikut adalah alasan-alasan mengapa bidang pada ketinggian tersebut dipilih :

1. **Ketinggian 5,3 meter**

Alasan bidang pada ketinggian tersebut dipilih adalah karena pada ketinggian tersebut merupakan jalur keluar langsung dari *nozzle*, sehingga data bisa dipastikan data yang didapatkan cukup akurat.

2. **Ketinggian 7 meter**

Alasan bidang pada ketinggian tersebut diambil adalah karena pada ketinggian tersebut adalah bidang yang paling dekat dengan *coal inlet*. Bidang ini diperlukan untuk validasi data *coal inlet*.

### 3. Ketinggian 9 meter

Alasan bidang pada ketinggian tersebut diambil adalah karena pada ketinggian tersebut adalah bidang yang paling dekat dengan *secondary air inlet*, diperlukan untuk validasi data *secondary air*.

### 4. Ketinggian 12 meter

Alasan bidang pada ketinggian tersebut dipilih adalah untuk validasi data *secondary air*, jalur *secondary air* ada 16 oleh karena itu diperlukan 2 bidang untuk pemvalidasian data.

### 5. Ketinggian 20 meter

Alasan bidang pada ketinggian tersebut dipilih karena bidang tersebut merupakan center dari sumbu-y, sehingga data di bidang tersebut dirasa perlu.

### 6. Ketinggian 28 meter

Alasan bidang pada ketinggian tersebut dipilih adalah karena pada ketinggian tersebut terdapat *outlet* dari *boiler* menuju *cyclone*.

Gambar 3.3 (b) menunjukkan *plane-x* dan *plane-z* yang diperlukan untuk pengambilan gambar kontur baik kontur kecepatan, temperature, tekanan, maupun kontur volume fraksi dari pasir. *Plane-x* dan *plane-z* diambil dengan alasan bahwa pada bidang tersebut kontur akan bisa terlihat dengan jelas bila dibandingkan dengan tampilan dari *plane-y*.

## 3.5 Rancangan Penelitian

Rancangan parameter *input* penelitian simulasi numerik untuk menganalisa karakteristik fluidisasi, pembakaran dan potensi erosi *cyclone* pada CFB *boiler* PLTU Air Anyir Bangka akibat pengaruh variasi *air-fuel ratio* (AFR) dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Parameter *Input* Penelitian

<b>Parameter</b>	<b>Input</b>	<b>Nilai</b>
<i>Outlet</i>	Tekanan	Konstan (Tabel 3.5)
Batubara	Temperatur	
	<i>Mass flow rate</i>	
Udara pendorong batubara	Temperatur	
	<i>Mass flow rate</i>	
<i>Primary air</i>	Temperatur	Variasi (Tabel 3.6)
	<i>Mass flow rate</i>	
<i>Secondary air</i>	Temperatur	Konstan (Tabel 3.5)
	<i>Mass flow rate</i>	Variasi (Tabel 3.6)

Sedangkan parameter *output* pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Parameter *Output* Penelitian

<b>Tinjauan</b>	<b>Parameter</b>	<b>Data Hasil Simulasi</b>
Pembakaran	Temperatur	<i>Plane-x center furnace</i>
		<i>Plane-y</i> (5,3; 7; 9; 12; 20; 28 m)
Erosi Cyclone	Kecepatan	<i>Plane-y</i> (20; 26; 28; 29 m)
Fluidisasi	Volume Fraksi Pasir	<i>Plane-x center furnace</i>
		Pandangan Isometri
	Kecepatan <i>Superficial</i>	<i>Plane-x center furnace</i>



## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Properties Bahan Bakar

Properties bahan bakar batu bara untuk simulasi numerik ditunjukkan seperti pada Tabel 4.1. sebagai berikut

Tabel 4.1 Properties Bahan Bakar Batu Bara

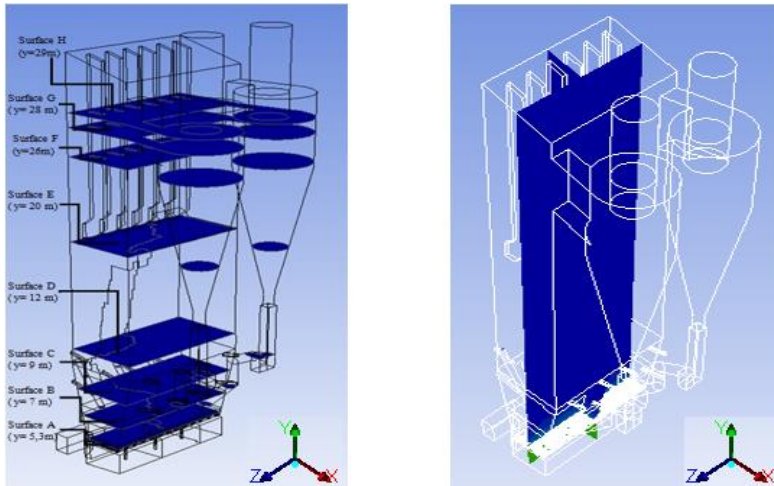
	design	checking 1	checking 2	rata-rata	(satuan)
<b>COAL PROPERTIES</b>					
inlet crusher	100				mm
outlet crusher	10				mm
total moisture	30.00%	28.60%	33.00%	30.80%	
coal inherent moisture	18.00%	13.80%	25.00%	19.40%	
ash	5.00%	4.60%	5.50%	5.05%	
volatile matter	35.00%	34.50%	32.70%	33.60%	
fixed carbon	30.00%	32.30%	28.80%	30.55%	
total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	
specific energy	4000	4300	3700	4000	kCal/kg
<b>COAL COMPOSITION</b>					
carbon	70.49%	69.46%	68.80%	69.13%	
hydrogen	3.35%	4.76%	3.42%	4.09%	
nitrogen	1.15%	1.56%	1.17%	1.36%	
oxygen	23.22%	23.92%	24.44%	24.18%	
sulphur	1.80%	0.30%	2.18%	1.24%	
total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	
<b>ASH TEMPERATURE</b>					
LDT	1050				C
ST	1100				C
HT	1150				C
FT	1200				C

Berdasarkan Tabel 4.1 diatas menunjukkan bahwa bahan bakar yang digunakan sudah sesuai dengan bahan bakar desain dari pembangkit tersebut, yaitu sebesar 4000 kCal/kg, sedangkan *moisture content* sedikit melebihi yaitu 30,80%. Sedangkan ukuran butiran serbuk batu bara menggunakan *inlet crusher* 100 mm dan *outlet crusher* 10 mm.

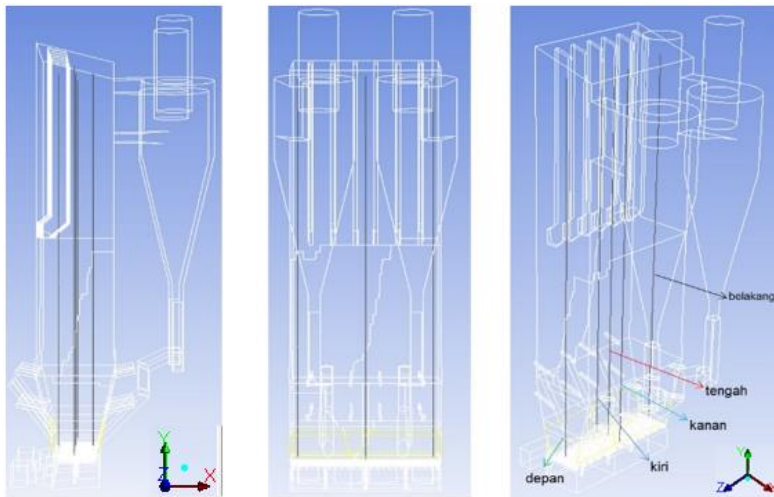
### 4.2 Hasil Geometri Set up

Sebelum menunjukkan hasil simulasi ANSYS FLUENT untuk proses fluidisasi dan pembakaran, terlebih dahulu ditunjukkan titik-titik pengukuran yang dilakukan untuk

memudahkan hasil analisis. Titik-titik pengukuran ditunjukkan seperti pada Gambar 4.1 dan 4.2 sebagai berikut :

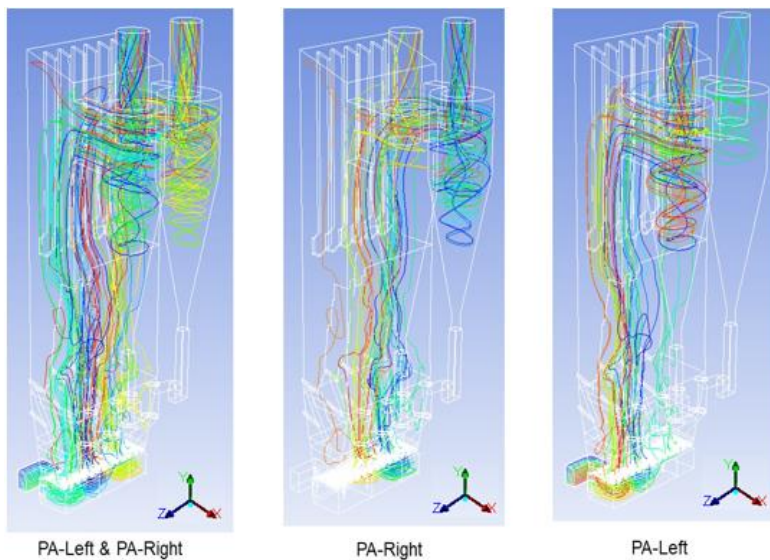


Gambar 4.1 Titik-titik Pengukuran pada Penampang Vertikal dan Horizontal



Gambar 4.2 Pandangan Depan, Kanan dan Isometris Geometri

Pada Gambar 4.1. ditunjukkan bahwa pada penampang horizontal terdapat 8 titik pengukuran mulai posisi diatas *nozzle* sampai posisi *upper furnace*. Sedangkan pada penampang vertikal terdapat 4 titik pengukuran, yaitu pada pada posisi *center* untuk bidang x, z pada *furnace* maupun *cyclone*. Sedangkan Gambar 4.2 menunjukkan pandangan depan, kanan dan isometris untuk geometri domain simulasi.



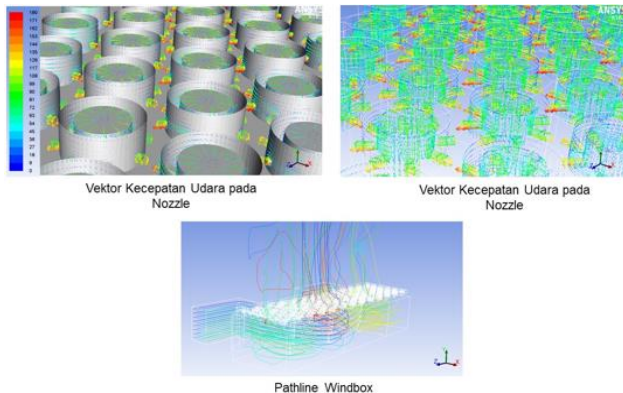
Gambar 4.3 Pathline Udara Pembakaran Sepanjang Geometri domain simulasi (a)

Dari hasil pengecekan terhadap *pathline* udara pembakaran melintasi geometri domain simulasi seperti pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa *pathline* udara masuk melalui *boundary inlet* dan bergerak melintasi *windbox*, *nozzle*, zona *lower furnace* sampai *upper furnace*. Lintasan selanjutnya memasuki *cyclone* dan keluar pada *exit cyclone*. Dikarenakan yang disimulasikan hanya udara pembakaran maka tidak ada udara yang bergerak kebagian *drain cyclone*. Hal ini menunjukkan bahwa geometri dan *meshing* yang telah dibuat merupakan 1 unit domain

simulasi yang dibatasi oleh *boundary inlet* dan *outlet* dan tersusun dari *meshing* area yang terhubung satu dengan yang lain.

Pengecekan *pathline* juga dilakukan pada bagian-bagian instrumen yang krusial, yaitu *windbox*, *nozzle* dan *lower furnace* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pada Gambar menunjukkan bahwa lintasan udara memasuki *nozzle* dari bagian bawah dan keluar terdistribusi merata pada 8 lubang *nozzle*. Selanjutnya lintasan udara menuju *lower furnace* dan bergerak menuju *upper furnace*. Pada Gambar 4.4. bagian bawah menunjukkan bahwa lintasan udara memasuki *lower furnace* cenderung kurang terdistribusi merata sepanjang penampang horizontal, tetapi lebih terkonsentrasi pada lintasan tengah (*center*). Hal ini bisa disebabkan hisapan kipas (*induced fan*) pada cerobong relatif kuat.

Untuk lintasan *primary* dan *secondary air* sebelah kiri dan kanan atau lintasan 1 dan 2, pencampurannya pada *header* udara kurang bisa menghasilkan pencampuran yang homogen, sehingga *primary air* keluar *nozzle* cenderung terdistribusi kurang merata atau seragam, cenderung mengumpul di sisi kiri dan sisi kanan. Hal ini menyebabkan *pathline* udara juga menunjukkan ketidakseragaman sepanjang lintasan, mulai keluar *nozzle*, sepanjang *furnace* maupun memasuki *cyclone*.



Gambar 4.4 Pathline Udara Pembakaran Sepanjang Geometri Domain Simulasi (b)

Pada bagian pembahasan ini, analisa akan dibahas sesuai dengan tujuan yang ada yaitu dibagi menjadi analisa fluidisasi, analisa erosi pada *cyclone* dan juga analisa pada bagian pembakaran didalam *furnace*. Selain pembahasan melalui kontur, pembahasan juga akan meliputi pembahasan mengenai grafik nilai yang didapat. Grafik yang akan dibahas adalah grafik nilai volume fraksi pasir, grafik kecepatan superficial udara, kecepatan pasir dan juga temperature pembakaran. Variasi meliputi :

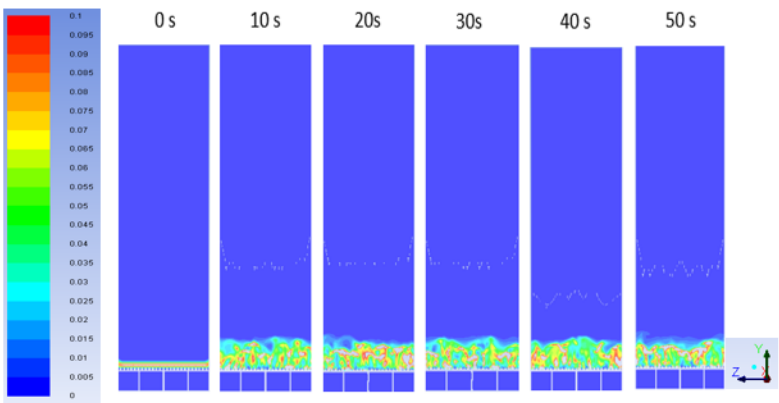
Tabel 4.2 Variasi Air – Fuel Ratio (AFR)

<b>Air – Fuel Ratio (AFR)</b>	<b><math>\dot{m}</math> Total Udara (kg/s)</b>	<b><math>\dot{m}</math> primary air (kg/s)</b>	<b><math>\dot{m}</math> secondary air (kg/s)</b>	<b><math>\dot{m}</math> udara coal (kg/s)</b>	<b><math>\dot{m}</math> Batubara (kg/s)</b>
3,12	17,33	12,33	3,445	1,56	5,556
4,72	26,22		12,334		
6,00	33,34		19,446		
9,00	50,00		36,114		

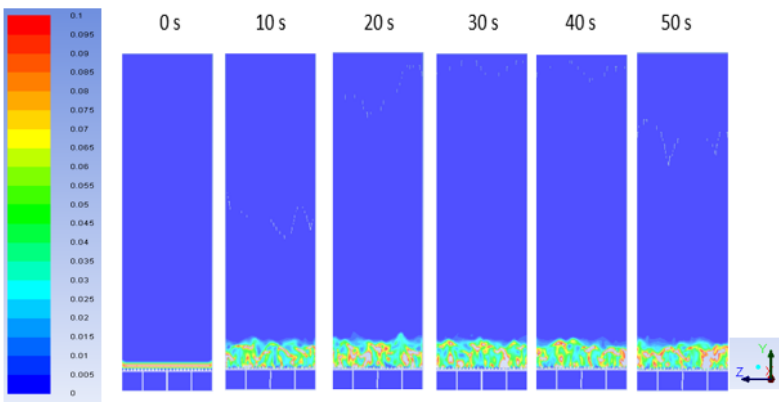
### 4.3 Analisa Karakteristik Fluidisasi

#### 4.3.1 Analisa Volume Fraksi Pasir

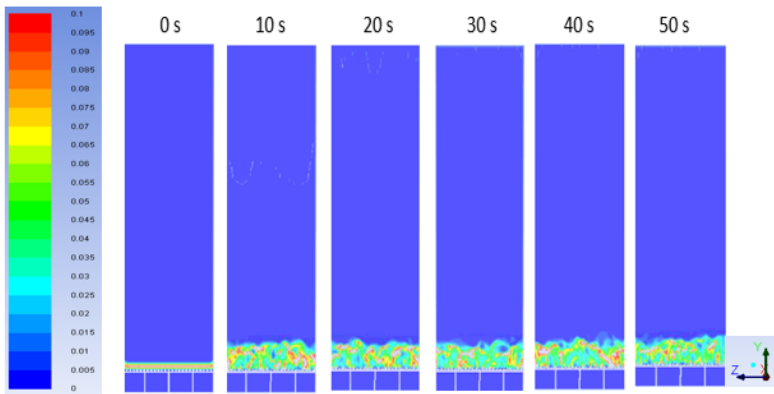
Pada bagian pembahasan ini akan membahas bagaimana karakteristik fluidisasi yang terjadi didalam *furnace*, karakteristik fluidisasi yang diteliti adalah dengan melihat evolusi kenaikan pasir pada sumbu-x *furnace* dengan beberapa macam *timestep*.



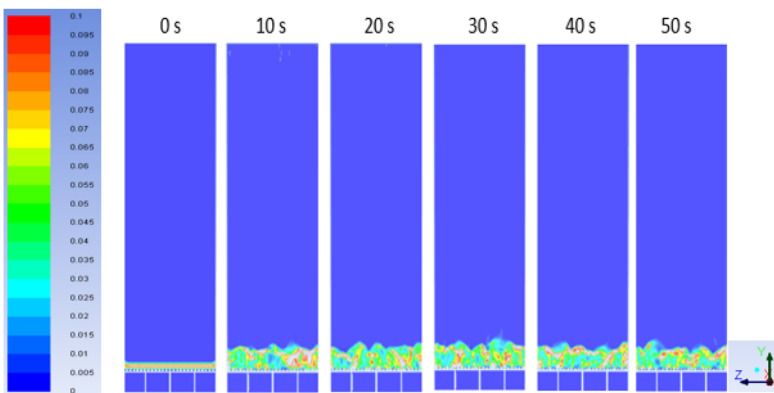
Gambar 4.5 Volume fraksi pasir sumbu-x AFR 3.12



Gambar 4.6 Volume fraksi pasir sumbu-x AFR 4.72



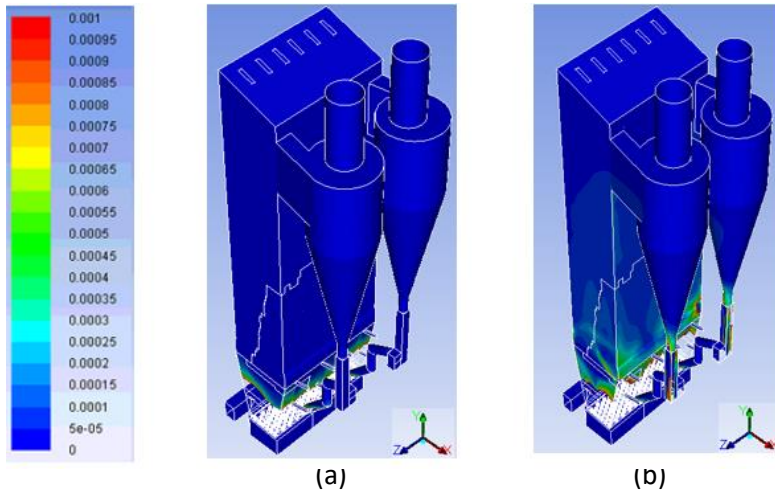
Gambar 4.7 Volume fraksi pasir sumbu-x AFR 6



Gambar 4.8 Volume fraksi pasir sumbu-x AFR 9

Pada pengambilan gambar untuk kontur fluidisasi pasir pada gambar 4.5, gambar 4.6, gambar 4.7 dan juga gambar 4.8 fluidisasi pasir tidak terlihat perbedaannya untuk tiap variasi AFR dan juga perbedaan waktu pengambilan. Hal ini bisa terjadi pada penampakan kontur dikarenakan hal-hal seperti *range* nilai masih kurang atau lebih atau juga bisa terjadi karena memang rasio udara dan bahan bakar tidak terlalu berpengaruh terhadap terangkatnya pasir untuk fluidisasi pada sumbu-x. Untuk memastikan hal ini

maka akan ditinjau kembali kemampuan fluidisasi tiap variasi rasio udara dan bahan bakar untuk pandangan isometri dan *range* volume fraksi akan diperkecil.

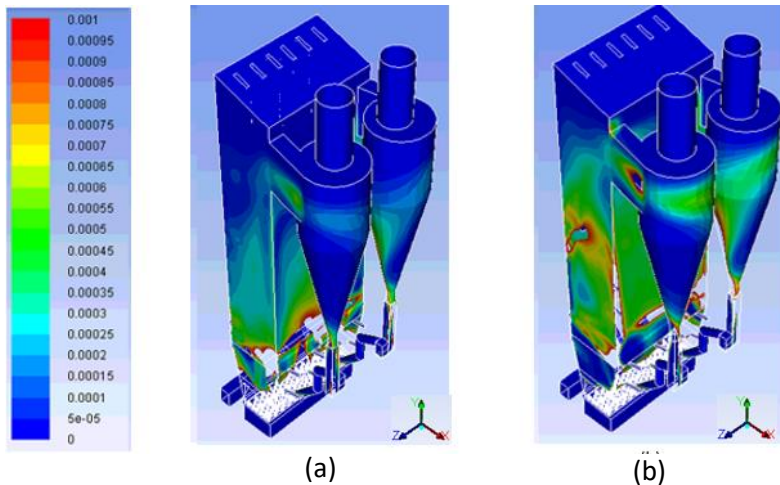


Gambar 4.9 Volume fraksi pasir pada pandangan isometri untuk AFR 3.12 (a) dan 4.72 (b)

Evaluasi terhadap proses fluidisasi ini diperjelas dengan penunjukkan gambar isometri untuk proses simulasi AFR 3.12 diatas, yaitu pada Gambar 4.9 (a) kontur volume fraksi pasir AFR 3.12 pandangan isometri. Pada Gambar 4.9 (a). dengan kondisi pengoperasian yang ada bahwa posisi pasir masih belum terfluidisasi dengan baik, sehingga hal ini cenderung maningkatkan tekanan pada *windbox* dan penurunan *mass flow rate* udara. Pengoperasian demikian yang terus-menerus menyebabkan terjadinya *over heating*. Evaluasi terhadap proses fluidisasi variasi AFR 4.72 diperjelas dengan penunjukkan gambar isometri untuk proses simulasi AFR 4.72 diatas, relatif terjadi fluidisasi dengan stabil, pasir mulai terangkat ke tengah (zona *medium furnace*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9 (b) Pada kondisi ini material



bed hanya terangkat sampai sedikit dibawah *upper furnace*. Kestabilan ini dibutuhkan untuk kontinuitas proses dan jaminan material *bed* tidak terangkat . Pengoperasi pada variasi AFR ini juga terbilang tidak berbahaya karena pasir belum menyentuh superheater yang jika menyentuh akan terjadi overheating pada pasir lalu proses fluidisasi tidak akan terjadi secara optimal.

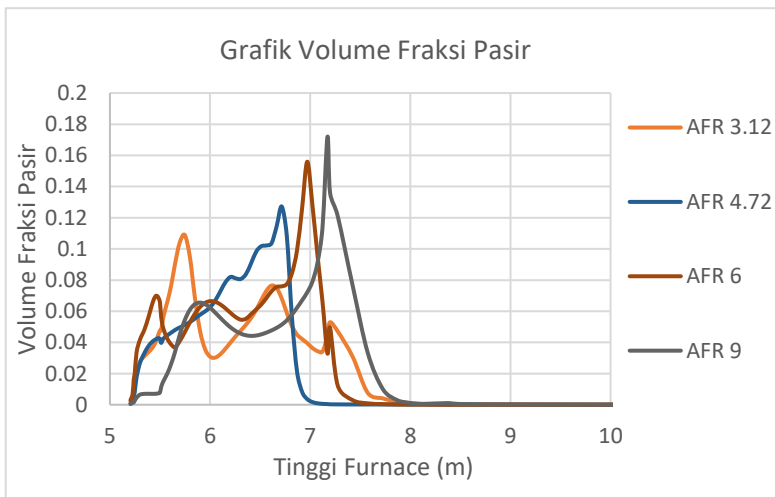


Gambar 4.10 Volume fraksi pasir pada pandangan isometri untuk AFR 6 (a) dan 9 (b)

Evaluasi terhadap proses fluidisasi ini diperjelas dengan penunjukkan gambar isometri untuk proses simulasi AFR 6.00 diatas, pasir mulai terangkat ke tengah (zona *medium furnace*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10 (a) Pada kondisi ini material bed rata-rata terangkat sampai sedikit dibawah *upper furnace*. Kondisi ini menghasilkan kecepatan fluidisasi lebih dari 15 m/s dan tidak terlalu direkomendasikan untuk kestabilan proses fluidisasi.. Evaluasi terhadap proses fluidisasi AFR 9 diperjelas dengan penunjukkan gambar isometri untuk proses simulasi AFR 9.00 diatas, pasir mulai terangkat ke tengah (zona *medium furnace*) dan zona *upper furnace* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10 (b)

Pada kondisi ini material bed rata-rata terangkat sampai *upper furnace* dan hingga masuk kedalam *cyclone*. Kondisi ini menghasilkan kecepatan fluidisasi lebih dari 15 m/s dan tidak terlalu direkomendasikan untuk kestabilan proses fluidisasi. Persamaan dari kedua gambar diatas adalah mulai banyaknya pasir yang masuk kedalam *cyclone*, hal ini harus dicegah karena pasir yang memasuki *cyclone* akan memperbesar terjadinya kemungkinan erosi *cyclone* dan hal ini sangat tidak diinginkan oleh sebuah perusahaan, pembahasan mengenai erosi pada *cyclone* akan dibahas lebih lanjut pada sub bab lainnya.

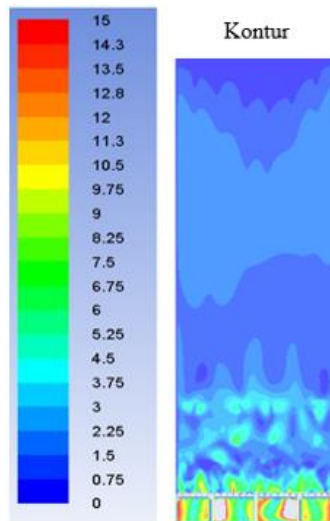
Untuk pembahasan mengenai nilai volume fraksi pasir yang terangkat didalam furnace akan dibahas lagi dalam bentuk grafik. Grafik yang akan ditampilkan adalah evolusi nilai volume fraksi pasir untuk keempat variasi. Penampang yang akan diambil nilainya adalah penampang tengah pada sumbu-z.



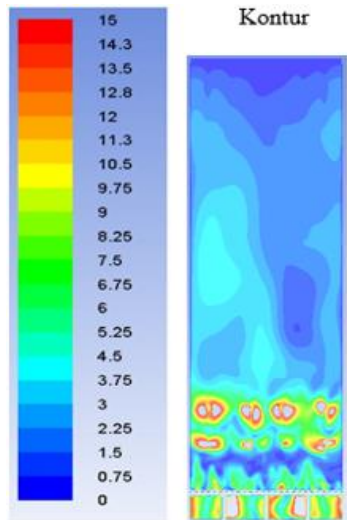
Gambar 4.11 Grafik volume fraksi pasir pada garis tengah furnace untuk tiap variasi AFR

#### 4.3.2 Analisa Kecepatan Udara *Superficial*

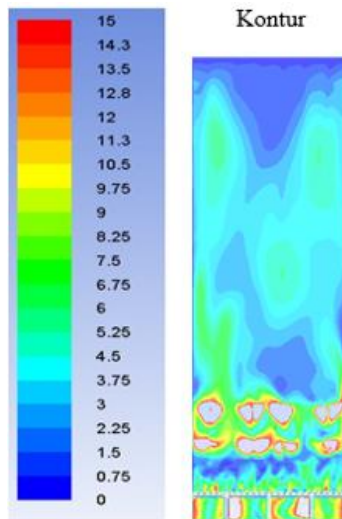
Selain dengan analisa volume fraksi pasir, pembahasan mengenai karakteristik fluidisasi juga akan dibahas melalui pembahasan kecepatan udara *superficial*. Penjelasan dari kecepatan udara *superficial* adalah nilai kecepatan udara yang ditinjau mengarah sumbu-y atau kecepatan udara yang mengarah ke atas. Penjabaran mengenai kecepatan udara *superficial* akan ditampilkan dalam bentuk kontur pada sumbu-x, *pathline* udara baik dari *inlet primary air left* dan *inlet primary air right* dan juga akan dijabarkan dalam bentuk grafik yang diambil pada penampang tengah.



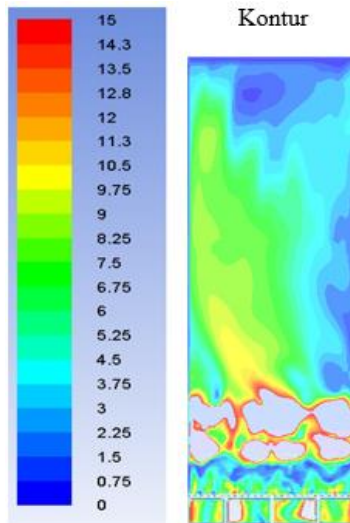
Gambar 4.12 Kontur udara pada variasi AFR 3.12



Gambar 4.13 Kontur udara pada variasi AFR 4.72



Gambar 4.14 Kontur udara pada variasi AFR 6.00

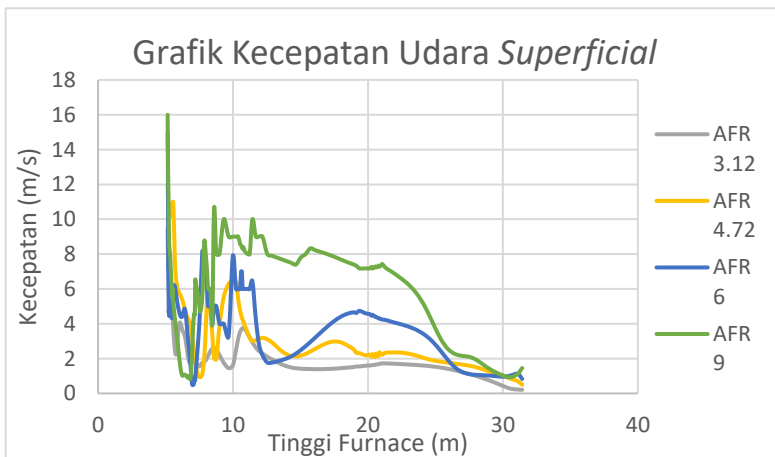


Gambar 4.15 Kontur udara pada variasi AFR 9.00

Evaluasi terhadap proses fluidisasi, selain melihat kontur volume fraksi, juga mengamati kontur dan *pathline* kecepatan udara. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.12, gambar 4.13, gambar 4.14 dan juga gambar 4.15. Pada Gambar 4.12 menunjukkan kontur dan *pathline* kecepatan udara untuk variasi AFR 3.12 menghasilkan kecepatan fluidisasi sebesar 10 m/s maksimal, dan rata-rata kecepatan udara yang ada di *furnace* hanya mencapai 5 m/s. Hal ini menyebabkan fluidisasi belum terlalu terangkat dan cenderung menumpuk sedikit diatas zona *nozzle*. Pada Gambar 4.13 menunjukkan kontur dan *pathline* kecepatan udara untuk variasi AFR 4.72 menghasilkan kecepatan fluidisasi sebesar 15 m/s maksimal, dan rata-rata kecepatan udara yang ada di *furnace* hanya mencapai 7 m/s. Perbedaan dari kedua variasi tersebut adalah bahwa pada variasi AFR 4.72 persebaran udara sedikit lebih baik yang dibuktikan dengan nilai rata-rata kecepatan udara dan nilai maksimal melebihi daripada variasi AFR 3.12

Evaluasi terhadap proses fluidisasi pada gambar 4.14 menunjukkan kontur dan *pathline* kecepatan udara untuk variasi

AFR 6.00 menghasilkan kecepatan fluidisasi sebesar lebih dari 15 m/s maksimal, dan rata-rata kecepatan udara yang ada di *furnace* bisa mencapai 9 m/s. Hal ini menyebabkan fluidisasi sudah cukup terangkat dan cenderung menumpuk sedikit di zona *medium furnace*. Evaluasi terhadap proses fluidisasi pada gambar 4.15 menunjukkan kontur dan *pathline* kecepatan udara untuk variasi AFR 9.00 menghasilkan kecepatan fluidisasi sebesar lebih dari 15 m/s maksimal, dan rata-rata kecepatan udara yang ada di *furnace* bisa mencapai lebih dari 10 m/s. Hal ini menyebabkan fluidisasi sudah cukup terangkat dan cenderung menumpuk sedikit di zona *medium furnace* dan *upper furnace*. Dari keempat variasi diatas yang bisa termasuk pengoperasian yang aman adalah pengoperasian pada rasio udara dan bahan bakar 3.12, 4.72 dan 6. Pengoperasian pada AFR 9 bisa dibilang tidak cukup aman dikarenakan kecepatan udara rata-rata yang ada didalam *furnace* melebihi 10 m/s dan itu cukup berbahaya dikarenakan bisa merusak *furnace* dari dalam dan menyebabkan kurangnya performa CFB *boiler* untuk kedepannya.



Gambar 4.16 Grafik kecepatan udara *superficial* pada garis tengah furnace untuk setiap variasi AFR

Pada gambar 4.16 ditampilkan grafik untuk kecepatan udara untuk setiap variasi AFR dari 3.12, 4.72, 6.00 dan 9.00. Pada grafik kecepatan udara untuk AFR 3.12 pada saat keluar dari *nozzle* nilai kecepatan udara maksimal mencapai 9.5 m/s lalu turun dengan signifikan hingga nilai 1.8 m/s pada ketinggian 7.5 m dan nilai dari kecepatan udara grafik AFR 3.12 terus konstan hingga akhir tinggi *furnace* pada ketinggian 31.8 m. Gambar 4.16 juga menunjukkan grafik evolusi kecepatan udara vertikal pada AFR 4.72, pada saat keluar dari *nozzle* kecepatan udara mencapai 12 m/s lalu kecepatan udara menurun hingga nilai kecepatan udara senilai 1 m/s, hal ini disebabkan oleh kecepatan udara yang mengarah keatas tertahan oleh aliran udara yang mengarah kebawah yaitu oleh *secondary air*, setelah udara *primary air* bercampur dengan udara *secondary air* nilai kecepatan udara kembali meningkat hingga ketinggian 10 m dengan nilai 6.2 m/s dan terus menurun hingga konstan pada akhir ketinggian *furnace*.

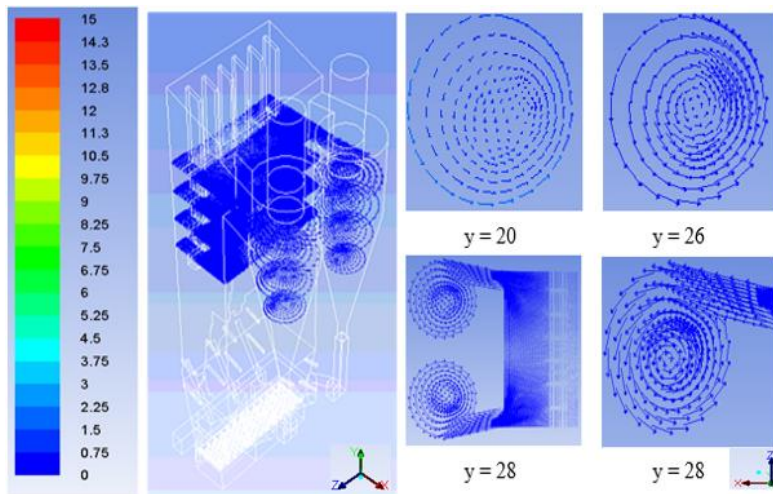
Gambar 4.16 juga memuat grafik untuk variasi AFR 6.00, nilai kecepatan udara *superficial* pada saat keluar dari *nozzle* mencapai nilai 15 m/s dan terus turun secara cepat hingga nilai 0.7 m/s, perbedaan dibanding nilai AFR sebelumnya adalah nilai minimal yang terjadi lebih kecil daripada AFR 4.72 hal ini disebabkan oleh nilai *secondary air* untuk AFR 6.00 lebih besar daripada nilai *secondary air* AFR 4.72, sehingga hal ini menyebabkan dorongan udara dari atas lebih besar dan itu mempengaruhi nilai kecepatan *superficial* dari variasi AFR 6.00. Hal yang sama juga berlaku untuk variasi AFR 9.00, dimana kecepatan pada saat bertemu dengan aliran *secondary air* hanya mencapai 0.4 m/s, dibandingkan dengan saat keluar dari *nozzle* kecepatan dari aliran udara mencapai 16 m/s yang merupakan kecepatan *superficial* paling tinggi dibanding variasi AFR lainnya. Dari titik minimal tadi kecepatan udara *superficial* terus meningkat hingga 10 m/s pada ketinggian *furnace* 10 m, lalu kecepatan udara terus menurun hingga akhir tinggi *furnace*.

Dari keempat garis pada grafik diatas bisa disimpulkan bahwa kenaikan AFR dengan meningkatkan nilai *secondary air*

cukup berpengaruh terhadap kecepatan udara *superficial* didalam *furnace*. Dimana semakin tinggi nilai AFR maka nilai dari kecepatan udara *superficial* akan meningkat juga dan pada saat titik pertemuan dengan *secondary air* maka kecepatan udara *superficial* akan semakin turun.

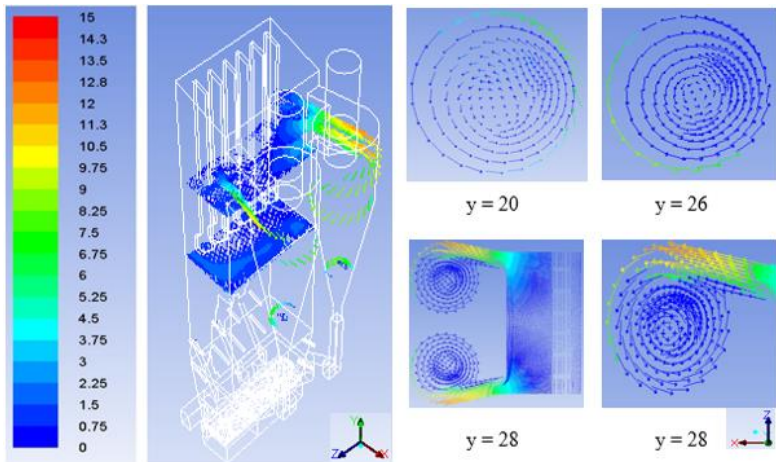
#### 4.4 Analisa Erosi Akibat Pasir

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai potensi erosi yang bisa terjadi baik didalam *furnace* maupun *cyclone*. Analisa potensi erosi ini akan dijabarkan melalui tampilan vektor kecepatan pasir pada penampang melintang didalam *furnace* dan *cyclone*. Dari tampilan ini bisa diketahui kecepatan pasir yang melewati bagian *furnace* dan juga *cyclone*, jika kecepatan terlalu tinggi maka potensi erosi juga akan semakin besar terjadi.

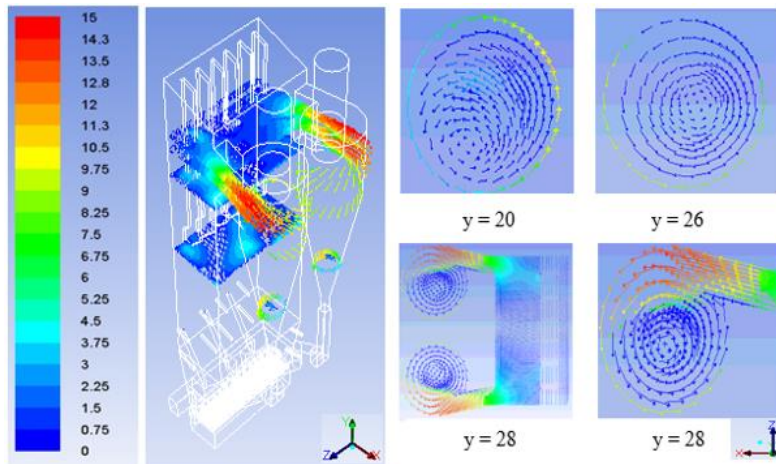


Gambar 4.17 Vektor kecepatan pasir untuk variasi elevasi pada *furnace* dan *cyclone* AFR 3.12

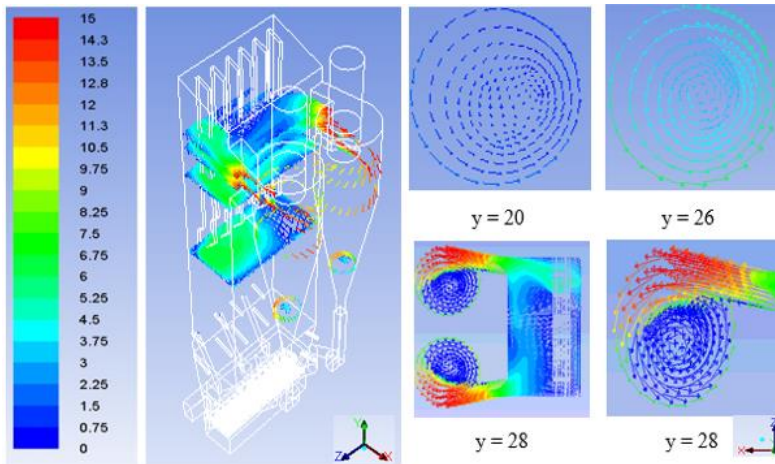




Gambar 4.18 Vektor kecepatan pasir untuk variasi elevasi pada *furnace* dan *cyclone* AFR 4.72



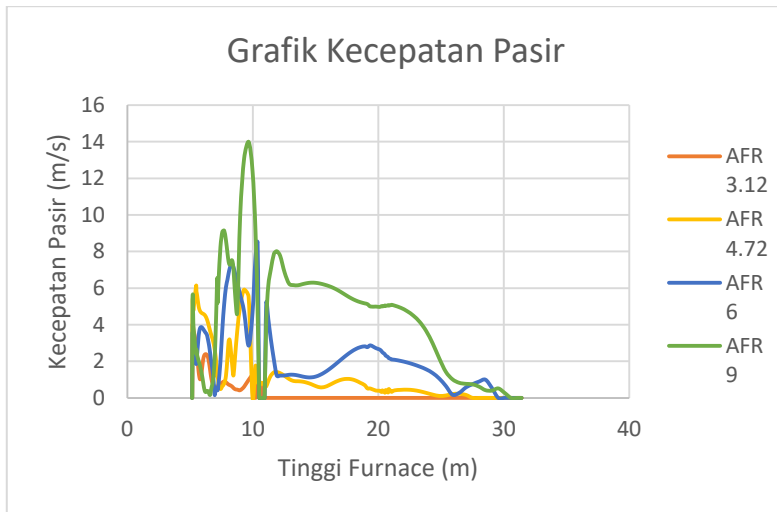
Gambar 4.19 Vektor kecepatan pasir untuk variasi elevasi pada *furnace* dan *cyclone* AFR 6.00



Gambar 4.20 Vektor kecepatan pasir untuk variasi elevasi pada *furnace* dan *cyclone* AFR 9.00

Pada evaluasi proses fluidisasi menunjukkan bahwa pada variasi AFR 3.12 semuanya tidak menunjukkan adanya material *bed* yaitu pasir yang terangkat dan masuk kedalam zona *cyclone*. Hal ini seperti ditunjukkan pada gambar vektor kecepatan pasir pada Gambar 4.17. Pada Gambar 4.17 menunjukkan bahwa proses fluidisasi belum stabil sehingga material *bed* tidak menghasilkan kesetimbangan dengan kecepatan *primary air* sehingga pasir tidak terangkat sampai pada posisi zona *medium furnace*. Pada evaluasi proses fluidisasi variasi AFR 4.72 sudah ada pasir yang memasuki *cyclone* walaupun hanya sedikit, pada elevasi  $y=20$  dan  $y=26$  kecepatan pasir hanya mencapai 6 m/s, tetapi pada elevasi  $y=28$  terkhusus dibagian lingkaran luar *cyclone* kecepatan pasir sudah mencapai 110 m/s. Hal ini merupakan hal yang tidak diinginkan untuk adanya pasir yang masuk kedalam *cyclone* dengan jumlah yang banyak karena bisa menyebabkan tererosinya *cyclone*. Hal ini seperti ditunjukkan pada gambar vektor kecepatan pasir pada Gambar 4.18.

Pada evaluasi proses fluidisasi variasi AFR 6.00 sudah ada pasir yang memasuki *cyclone* dengan jumlah yang lebih banyak dibandingkan dengan variasi AFR sebelumnya, pada elevasi  $y=20$  dan  $y=26$  kecepatan pasir hanya mencapai 9 m/s, tetapi pada elevasi  $y=28$  terkhusus dibagian lingkaran luar *cyclone* kecepatan pasir sudah mencapai 14 m/s. Hal ini merupakan hal yang tidak diinginkan untuk adanya pasir yang masuk kedalam *cyclone* karena bisa menyebabkan tererosinya *cyclone*. Hal ini seperti ditunjukkan pada gambar vektor kecepatan pasir pada Gambar 4.19. Pada evaluasi proses fluidisasi menunjukkan bahwa pada variasi AFR 9.00 banyak pasir yang memasuki *cyclone* dengan jumlah yang paling banyak dibandingkan dengan variasi-variasi AFR sebelumnya, pada elevasi  $y=20$  dan  $y=26$  kecepatan pasir mencapai 10 m/s, tetapi pada elevasi  $y=28$  terkhusus didalam *cyclone* dan dilingkaran bagian luar *cyclone* kecepatan pasir sudah mencapai kecepatan maksimal yaitu 15 m/s. Hal ini merupakan hal yang sangat tidak diinginkan untuk adanya pasir yang masuk kedalam *cyclone* dengan jumlah banyak karena bisa menyebabkan tererosinya *cyclone*. Hal ini seperti ditunjukkan pada gambar vektor kecepatan pasir pada Gambar 4.20. Jika bagian dalam *cyclone* tererosi maka pemisahan partikel antara udara dan partikel lainnya tidak akan berjalan lancar sehingga akan mempengaruhi kinerja *cyclone* dan nantinya akan mempengaruhi kinerja pembangkit secara keseluruhan.



Gambar 4.21 Grafik kecepatan pasir pada penampang tengah furnace untuk setiap variasi AFR

Gambar 4.21 menunjukkan empat garis yang melambangkan kecepatan pasir yang melewati penampang tengah *furnace* untuk keempat variasi yang disimulasikan yaitu AFR 3.12, 4.72, 6.00 dan 9.00. Pada garis untuk AFR 3.12 kecepatan pasir maksimal hanya mencapai kecepatan 2.5 m/s pada ketinggian *furnace* 5.2 m hal ini disebabkan oleh langsung terangkatnya pasir oleh aliran udara yang keluar dari *nozzle* masih kecepatan maksimal, lalu kecepatan pasir terus menurun hingga ketinggian 10 m kecepatan pasir mencapai titik 0 m/s atau tidak ada pasir lagi di daerah tersebut hingga ke titik akhir *furnace*. Pada variasi AFR 4.72 perbedaan dibanding AFR 3.12 adalah kecepatan pasir maksimal mencapai 6 m/s pada ketinggian *furnace* 5.2 m lalu turun hingga kecepatan 0.5 m/s pada ketinggian 7.5 m dan kemudian naik lagi ke 6 m/s pada ketinggian 9 m. Grafik kemudian turun secara signifikan hingga 0.5 m/s dan konstan hingga ketinggian 20 m lalu menjadi 0 pada ketinggian 25 m hingga akhir tinggi *furnace*.

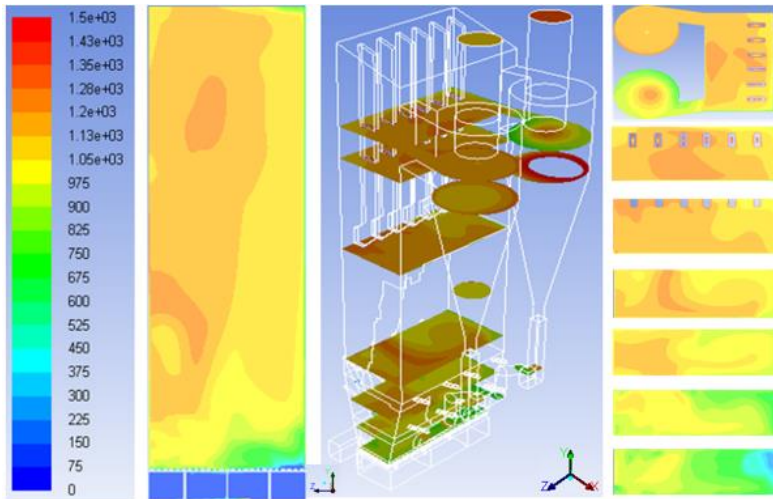
Pada variasi AFR 6.00 kecepatan maksimal pasir berada pada ketinggian 10 m yang berarti berbeda dengan variasi-variasi

sebelumnya, nilai maksimal yang dicapai adalah 8 m/s lalu kecepatan pasir terus menurun hingga kecepatan pasir 1.5 m/s pada ketinggian 12 m dan terus konstan hingga ketinggian 15 m lalu naik lagi hingga kecepatan 2.5 m/s di ketinggian 18 m, kecepatan pasir kemudian menurun secara landai dan akhirnya mengenai titik 0 pada ketinggian *furnace* 27 m. Untuk variasi AFR 9.00 kecepatan pasir maksimal juga ada pada ketinggian 10 m pada *furnace* dengan nilai kecepatan pasir mencapai 14 m/s. Kecepatan pasir kemudian turun dan naik lagi pada kecepatan pasir 8 m/s dan turun pada kecepatan 6 m/s di ketinggian 15 m dan terus menurun dengan landai hingga akhirnya menyentuh angka 0 pada ketinggian *furnace* 29 m.

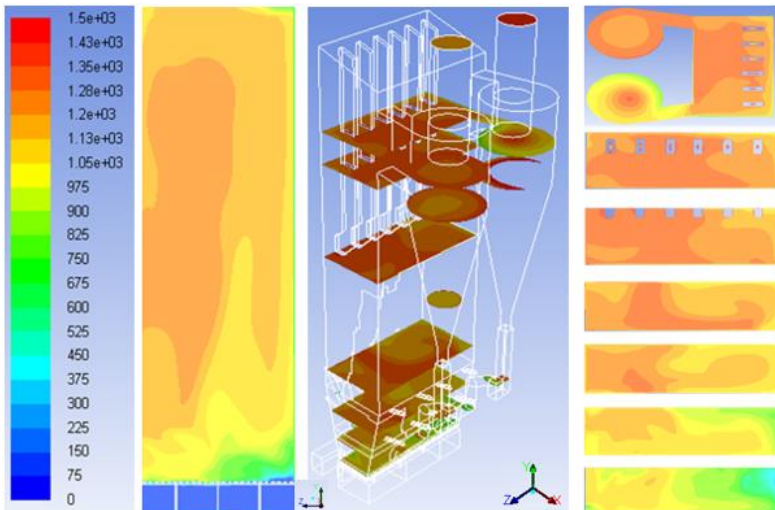
Dari grafik diatas bisa ditarik kesimpulan pengaruh dari peningkatan secondary air maka kecepatan dan pasir yang bisa berada di bagian *furnace* juga akan berpengaruh. Seperti variasi AFR 3.12 pasir hanya mencapai bagian *lower furnace*, pada variasi AFR 4.72 pasir hanya mencapai bagian *lower furnace* dan *medium furnace*, untuk variasi AFR 6.00 dan 9.00 pasir sudah mencapai bagian *upper furnace*. Nilai kecepatan pasir maksimal yang bisa dicapai juga berbeda untuk setiap variasinya. Nilai kecepatan pasir maksimal berbanding lurus dengan rasio udara dan bahan bakar yang dimasukkan kedalam *boiler*.

#### 4.5 Analisa Karakteristik Pembakaran

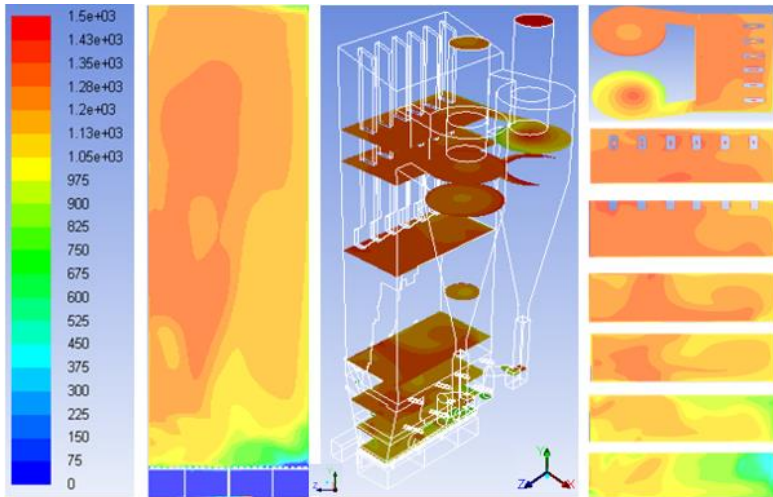
Pada hasil simulasi pembakaran ini, akan ditampilkan kontur temperatur yang ada pada *furnace* dan *cyclone*, kontur temperatur akan ditampilkan dalam bentuk 2 sumbu yaitu sumbu-x dan juga sumbu-y untuk beberapa tingkat elevasi.



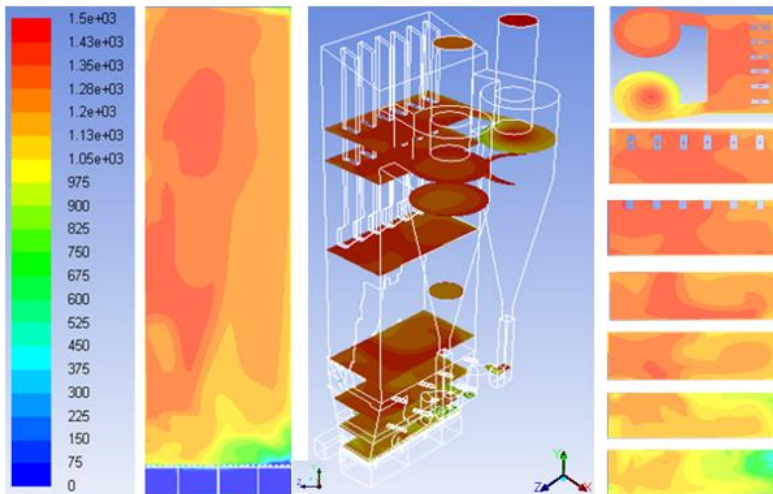
Gambar 4.22 Kontur temperatur untuk AFR 3.12 pada sumbu-x dan sumbu-y variasi elevasi *furnace* (satuan kelvin)



Gambar 4.23 Kontur temperatur untuk AFR 4.72 pada sumbu-x dan sumbu-y variasi elevasi *furnace* (satuan kelvin)



Gambar 4.24 Kontur temperatur untuk AFR 6.00 pada sumbu-x dan sumbu-y variasi elevasi *furnace* (satuan kelvin)



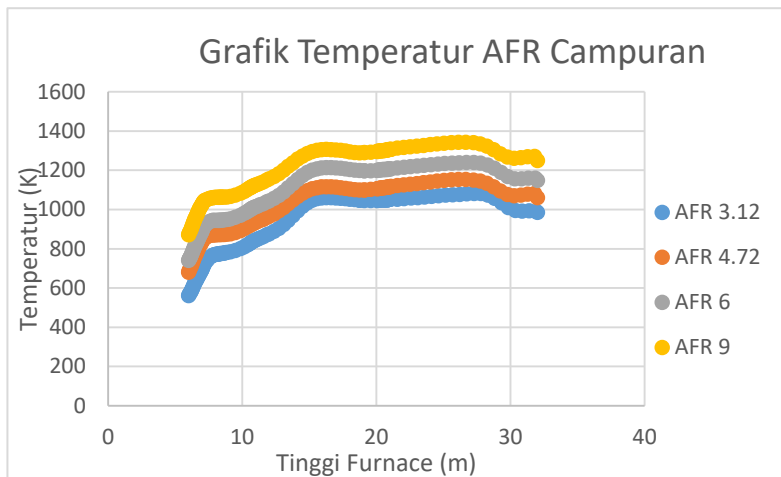
Gambar 4.25 Kontur temperatur untuk AFR 9.00 pada sumbu-x dan sumbu-y variasi elevasi *furnace* (satuan kelvin)

Pada *running* pembakaran menggunakan data-data untuk AFR 3.12 didapatkan gambar-gambar kontur temperatur pada sumbu-x dan juga sumbu-y untuk variasi elevasi *furnace*. Rata-rata nilai temperatur *furnace* yang ditunjukkan pada gambar 4.22 adalah senilai 1050K atau 777 °C. Ini sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa temperatur maksimal yang bisa dicapai CFB *Boiler* adalah sebesar 950 derajat Celcius [2]. Distribusi suhu pembakaran relatif sudah merata sepanjang *furnace* di zona *lower*, *medium* dan *upper furnace*. Pada bagian bawah *furnace* masih terdapat sedikit bagian temperatur berkisar pada 500K, pada segmen tersebut pembakaran belum terlalu terjadi sehingga temperatur masih rendah. Pada *running* pembakaran untuk variasi AFR 4.72 didapatkan gambar-gambar kontur temperatur pada sumbu-x dan juga sumbu-y untuk variasi elevasi *furnace* sama dengan variasi sebelumnya. Rata-rata nilai temperatur *furnace* yang ditunjukkan pada gambar 4.23 adalah senilai 1150K atau 877°C. Ini sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa temperatur maksimal yang bisa dicapai CFB *Boiler* adalah sebesar 950 derajat Celcius. Distribusi suhu pembakaran relatif sudah merata sepanjang *furnace* di zona *lower*, *medium* maupun *upper furnace*. Pada bagian bawah *furnace* masih terdapat sedikit bagian temperatur berkisar pada 600K, pada segmen tersebut pembakaran belum terlalu terjadi sehingga temperatur masih rendah. Perbedaan kontur temperatur 4.16 dan 4.10 adalah nilai temperatur pada AFR 4.72 rata-rata sedikit lebih tinggi daripada AFR 3.12.

Pada *running* pembakaran untuk AFR 6.00 didapatkan gambar-gambar kontur temperatur pada sumbu-x dan juga sumbu-y variasi elevasi *furnace*. Rata-rata nilai temperatur *furnace* yang ditunjukkan pada gambar 4.24 adalah senilai 1200K atau 927°C. Ini masih sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa temperatur maksimal yang bisa dicapai CFB *Boiler* adalah sebesar 950 derajat Celcius. Distribusi suhu pembakaran relatif sudah merata sepanjang *furnace* di zona *lower*, *medium* maupun *upper furnace*, tetapi pada bagian *medium furnace* pembakaran temperatur sedikit lebih tinggi pada bagian kiri dibanding bagian kanan. Pada bagian



bawah *furnace* masih terdapat sedikit bagian temperatur berkisar pada 650K, pada segmen tersebut pembakaran belum terlalu terjadi sehingga temperatur masih cukup rendah disbanding temperatur rata-rata *furnace*. Perbedaan kontur temperatur 4.24 dan 4.13 adalah nilai temperatur pada AFR 6.00 rata-rata sedikit lebih tinggi daripada AFR 4.72 dan juga AFR 3.12. Pada *running* pembakaran menggunakan data-data untuk AFR 9.00 didapatkan gambar-gambar kontur temperatur pada sumbu-x dan juga sumbu-y untuk variasi elevasi *furnace*. Rata-rata nilai temperatur *furnace* yang ditunjukkan pada gambar 4.25 adalah senilai 1300K atau 1027°C. Ini tidak sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa temperatur maksimal yang bisa dicapai CFB *Boiler* adalah sebesar 950 derajat Celcius. Distribusi suhu pembakaran relatif tidak cukup merata sepanjang *furnace* di zona *lower*, *medium* maupun *upper furnace*. Pada bagian bawah *furnace* masih terdapat sedikit bagian temperatur berkisar pada 700K, pada segmen tersebut pembakaran belum terlalu terjadi sehingga temperatur masih rendah. Perbedaan kontur temperatur 4.28 dan 4.22 adalah nilai temperatur pada AFR 9.00 rata-rata sedikit lebih tinggi daripada AFR 6.00. Perbedaan lain adalah temperatur maksimum AFR 9.00 melebihi batas maksimal temperatur CFB *Boiler* sedangkan untuk AFR 6.00 masih didalam batas maksimal. Kesimpulan untuk keempat gambar diatas adalah bahwa variasi AFR 3.12, 4.72 dan 6 masih tergolong aman untuk dioperasikan karena temperatur masih dibawah batas maksimal temperatur yang bisa dicapai CFB *boiler*, sedangkan untuk variasi AFR 9 tergolong tidak aman karena melebihi temperatur maksimal CFB *boiler* yaitu 1027°C.



Gambar 4.26 Grafik temperatur pembakaran pada penampang tengah *furnace* untuk setiap variasi AFR

Pada gambar 4.26 telah ditampilkan grafik untuk keempat garis variasi pada tiap AFR. Untuk garis AFR 3.12 tren untuk temperatur terus naik dari ketinggian *furnace* 6 m dengan temperatur 580K hingga ketinggian *furnace* 27 m dengan temperatur maksimal yang dicapai yaitu 1050K yang berarti temperatur maksimal yang dicapai oleh AFR 3.12 masih didalam batas maksimal CFB *boiler* yaitu 1223K. Hal yang sama juga berlaku untuk variasi AFR 4.72 yang menunjukkan temperatur maksimal yang dicapai adalah 1150K yang berarti juga masih didalam batas maksimal. Untuk variasi AFR 6 nilai temperatur hampir mencapai batas maksimal yaitu sebesar 1210K atau sama dengan 937 derajat celcius, tetapi dengan masih didalam batas maka untuk variasi AFR 6 masih bisa terbilang aman untuk dioperasikan meskipun memerlukan pengawasan khusus agar tidak melebihi batas. Pada variasi AFR 9 terlihat pada ketinggian *furnace* 17 m dan 27 m temperatur melebihi batas maksimal CFB *boiler* yaitu 1300K, maka dari itu untuk variasi AFR 9 bisa disebutkan bahwa tidak aman untuk dioperasikan karena melebihi temperatur kerja CFB *boiler* itu sendiri.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Simulasi untuk pengujian numerik yang dilakukan pada *circulating fluidized bed boiler* PLTU Air Anyir Bangka dengan variasi rasio udara dan bahan bakar 3.12, 4.72, 6.00 dan 9.00 telah dilakukan. Dari hasil simulasi untuk keempat variasi tersebut telah didapatkan beberapa kesimpulan, hasil studi numerik yang didapatkan adalah sebagai berikut :

1. Analisa untuk karakteristik fluidisasi dilakukan dengan 2 sudut yaitu sudut pengambilan data volume fraksi pasir dan kecepatan udara *superficial* pada *furnace*. Pengaruh rasio udara dan bahan bakar cukup berpengaruh terhadap pengangkatan pasir dengan nilai maksimal volume fraksi pasir yang berbeda antara satu dan lainnya. Nilai maksimal yang tertinggi dimiliki oleh variasi AFR 9.00 lalu diurut dengan 6.00, 4.72 dan terakhir variasi AFR 3.12. Nilai maksimal dari masing-masing AFR bisa berbeda dikarenakan *mass flow* udara dari *secondary air* terus ditingkatkan berbanding lurus dengan peningkatan AFR. Dengan kata lain inputan *secondary air* juga berpengaruh terhadap kemampuan pengangkatan pasir untuk fluidisasi didalam *furnace*. Untuk variasi AFR 3.12 dan 4.72 tidak ada pasir yang masuk sampai ke *cyclone*, sedangkan untuk variasi AFR 6 dan 9 ada substansi pasir yang masuk sampai ke *cyclone*.
2. Dapat disimpulkan bahwa kenaikan AFR dengan meningkatkan nilai *secondary air* cukup berpengaruh terhadap kecepatan udara *superficial* didalam *furnace*. Dimana semakin tinggi nilai AFR maka nilai dari kecepatan udara *superficial* akan meningkat juga dan pada saat titik pertemuan dengan *secondary air* maka kecepatan udara *superficial* akan semakin turun.

3. Kesimpulan untuk pengaruh dari peningkatan *secondary air* adalah kecepatan dan pasir yang bisa berada di bagian *furnace* juga akan berpengaruh. Seperti variasi AFR 3.12 pasir hanya mencapai bagian *lower furnace*, pada variasi AFR 4.72 pasir hanya mencapai bagian *lower furnace* dan *medium furnace*, untuk variasi AFR 6.00 dan 9.00 pasir sudah mencapai bagian *upper furnace*. Nilai kecepatan pasir maksimal yang bisa dicapai juga berbeda untuk setiap variasinya. Nilai kecepatan pasir maksimal berbanding lurus dengan rasio udara dan bahan bakar yang dimasukkan kedalam *boiler*. Untuk bagian *cyclone* yang rawan mengalami erosi adalah pada bagian luar lingkaran *cyclone* yang mana dari 4 variasi 3 variasi AFR menunjukkan bahwa pada lingkaran luar *cyclone* selalu ada kecepatan pasir didaerah tersebut.
4. Kesimpulan karakteristik temperatur adalah bahwa variasi AFR 3.12, 4.72 dan 6 masih tergolong aman untuk dioperasikan karena temperatur masih dibawah batas maksimal temperatur yang bisa dicapai CFB *boiler*, sedangkan untuk variasi AFR 9 tergolong tidak aman karena melebihi temperatur maksimal CFB *boiler* yaitu 1027°C.

### 5.2.1 Saran

Saran untuk penelitian berikutnya adalah untuk variasi yang dilakukan bisa berbeda dengan yang sudah pernah dilakukan, seperti misalnya memvariasikan menjadi beban menengah ataupun beban rendah. Variasi lain yang bisa diaplikasikan adalah dengan menggunakan jenis batu bara yang berbeda.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sujatmiko. 2015. *“Statistik Ketenagalistrikan 2014”*. **Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.**
- [2] Basu, P, 2015. **Circulating Fluidized Bed Boilers Design, Operation and Maintenance.** Halifax Canada: Springer.
- [3] Manunggal, T. 2014. *“Operation Manual CFB PLTU BABEL”*. **Manunggal Engineering**
- [4] Sa’adiyah, D.S. 2013. *“Studi Numerik Karakteristik Aliran, Pembakaran dan Emisi Gas Buang pada Tangentially Fired Boiler 625 MWe dengan Komposisi Batubara 70% LRC dan 30% MRC pada Kondisi Pengoperasian yang Berbeda (Studi Kasus PLTU Suralaya Unit 8)”*. **Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya.**
- [5] Hantyo, R. 2015. *“Studi Numerik Karakteristik Pembakaran dengan Variasi Mass Flow Rate Carrier Air dan Coal pada Start Up Burner”*. **Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya.**
- [6] Zhang, N., Lu, B., Wang, W., & Li, J. 2010. *“3D CFD Simulation of Hydrodynamics of a 150 MWe Circulating Fluidized Bed Boiler”*. **Chemical Engineering Journal**
- [7] Kinkar, A, S., Dhote, G, M., dan Chokkhae, R. R. 2015. *“CFD Simulation on CFBC Boiler”*. **International Journal of Scientific & Technology Research.**
- [8] Kumar, R., & Pandey, K. M. 2012. *“CFD Analysis of Circulating Fluidized Bed Combustion”*. Assam, India: **IRACST**
- [9] Sukadarrumidi. 2017. *“Batubara dan Pemanfaatannya”*. Indonesia: Gadjah Mada University Press.
- [10] Nursatria, A. 2015. *“Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Kecepatan Carrying Air Blower terhadap Laju Pembakaran Batubara”*. **Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya.**
- [11] Pandey, K. M., & Kumar, R. 2011. *“Numerical Analysis of Coal Combustion in Circulating Fluidized Bed”*. **International Journal of Chemical Engineering and Applications.**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

LAMPIRAN

LAMPIRAN A TABEL DATA TEMPERATUR

AFR 3.12		AFR 4.72		AFR 6		AFR 9	
Tinggi (m)	Suhu (K)	Tinggi (m)	Suhu (K)	Tinggi (m)	Suhu (K)	Tinggi (m)	Suhu (K)
6	561.603	6	680.805	6	740.186	6	870.805
6.027	564.503	6.027	685.215	6.027	743.791	6.027	875.215
6.078	570.513	6.078	693.713	6.078	751.044	6.078	883.713
6.129	576.943	6.129	702.365	6.09232	753.181	6.129	892.365
6.18	583.724	6.18	711.198	6.129	758.659	6.18	901.198
6.231	590.829	6.231	720.164	6.18	766.553	6.231	910.164
6.282	598.222	6.282	729.131	6.231	774.712	6.282	919.131
6.333	605.825	6.333	737.949	6.282	783.087	6.333	927.949
6.384	613.512	6.384	746.564	6.333	791.51	6.384	936.564
6.435	621.143	6.435	755.036	6.384	799.79	6.435	945.036
6.486	628.611	6.486	763.438	6.435	807.855	6.486	953.438
6.537	635.857	6.537	771.753	6.486	815.766	6.537	961.753
6.588	642.863	6.588	779.893	6.537	823.565	6.588	969.893
6.639	649.62	6.639	787.781	6.588	831.212	6.639	977.781
6.69	656.13	6.69	795.423	6.639	838.638	6.69	985.423
6.741	662.438	6.741	802.891	6.69	845.85	6.741	992.891
6.77897	667.07	6.792	810.218	6.741	852.98	6.792	1000.22
6.792	668.667	6.843	817.346	6.792	860.198	6.843	1007.35
6.843	674.972	6.894	824.151	6.843	867.604	6.894	1014.15
6.894	681.481	6.945	830.555	6.894	875.181	6.945	1020.56
6.945	688.348	6.996	836.573	6.945	882.859	6.996	1026.57
6.996	695.635	7.047	842.255	6.996	890.622	7.047	1032.26
7.047	703.312	7.098	847.551	7.047	898.449	7.098	1037.55
7.098	711.249	7.149	852.245	7.098	906.163	7.149	1042.24
7.149	719.106	7.2	855.341	7.149	913.345	7.2	1045.34
7.2	725.019	7.23673	856.745	7.2	918.319	7.23673	1046.74
7.35	738.507	7.35	861.083	7.35	928.236	7.35	1051.08
7.5	751.602	7.5	866.052	7.5	936.756	7.5	1056.05
7.65	760.882	7.65	869.048	7.65	941.63	7.65	1059.05
7.8	766.746	7.8	870.653	7.8	943.959	7.8	1060.65
7.8	766.746	7.8	870.653	7.8	943.959	7.8	1060.65
7.93055	769.927	7.93055	871.398	7.93055	944.723	7.93055	1061.4
8.035	771.567	8.035	871.75	8.035	944.781	8.035	1061.75
8.11855	772.507	8.11855	871.961	8.11855	944.665	8.11855	1061.96
8.18539	773.222	8.18539	872.137	8.18539	944.633	8.18539	1062.14
8.2427	773.849	8.2427	872.296	8.2427	944.705	8.2427	1062.3
8.3	774.502	8.3	872.461	8.3	944.879	8.3	1062.46
8.3573	775.229	8.3573	872.646	8.3573	945.178	8.3573	1062.65
8.41461	775.94	8.41461	872.808	8.41461	945.546	8.41461	1062.81
8.52291	777.161	8.52291	872.987	8.52291	946.286	8.52291	1062.99
8.66912	778.8	8.66912	873.218	8.66912	947.463	8.66912	1063.22
8.68675	779.007	8.8665	874.027	8.8665	949.502	8.8665	1064.03
8.8665	781.151	9.13297	876.465	9.13297	953.177	9.13297	1066.47
9.13297	784.824	9.4927	882.689	9.4927	960.251	9.4927	1072.69
9.4927	791.504	9.85243	892.577	9.85243	970.268	9.85243	1082.58
9.85243	800.749	10.1189	901.984	10.1189	979.579	10.1189	1091.98
10.1189	809.262	10.3163	909.704	10.3163	987.402	10.3163	1099.7
10.3163	816.627	10.4625	915.609	10.4625	993.617	10.4625	1105.61
10.4625	822.82	10.5708	920.193	10.5708	998.564	10.5708	1110.19
10.5708	827.994	10.6281	922.594	10.6281	1001.18	10.6281	1112.59
10.6281	830.814	10.6854	924.811	10.6854	1003.61	10.6854	1114.81
10.6854	833.481	10.7427	926.941	10.7427	1005.94	10.7427	1116.94
10.7427	836.055	10.8	928.852	10.8	1008.03	10.8	1118.85
10.8	838.396	10.8915	931.615	10.8915	1010.99	10.8915	1121.61
10.8915	841.666	11.0058	934.921	11.0058	1014.49	11.0058	1124.92
11.0058	845.538	11.1488	938.908	11.1488	1018.64	11.1488	1128.91
11.1488	850.054	11.3275	943.794	11.3275	1023.6	11.3275	1133.79
11.3275	855.355	11.5508	949.968	11.5508	1029.72	11.5508	1139.97
11.5508	861.713	11.83	959.351	11.83	1038.86	11.83	1149.35
11.83	870.952	12.01	965.659	12.01	1044.65	12.01	1155.66

12.01	876.608		12.3645	977.409		12.3645	1056.41		12.3645	1167.41
12.3645	888.618		12.719	992.706		12.719	1071.64		12.719	1182.71
12.719	904.174		13.0735	1010.37		13.0735	1089.73		13.0735	1200.37
13.0735	923.111		13.428	1029.46		13.428	1110.12		13.428	1219.46
13.428	945.12		13.7825	1048.8		13.7825	1131.74		13.7825	1238.8
13.7825	969.169		14.137	1067.08		14.137	1153.07		14.137	1257.08
14.137	993.444		14.4915	1083.09		14.4915	1172.4		14.4915	1273.09
14.4915	1015.67		14.846	1095.97		14.846	1188.3		14.846	1285.97
14.846	1033.76		15.2005	1105.41		15.2005	1200.03		15.2005	1295.41
15.2005	1046.67		15.555	1111.56		15.555	1207.66		15.555	1301.56
15.555	1054.62		15.9095	1114.94		15.9095	1211.88		15.9095	1304.94
15.9095	1058.68		16.264	1116.15		16.264	1213.59		16.264	1306.15
16.264	1060.15		16.6185	1115.68		16.6185	1213.49		16.6185	1305.68
16.6185	1060		16.973	1113.9		16.973	1212.1		16.973	1303.9
16.973	1058.82		17.3275	1111.08		17.3275	1209.78		17.3275	1301.08
17.3275	1056.98		17.682	1107.57		17.682	1206.84		17.682	1297.57
17.682	1054.74		18.0365	1103.87		18.0365	1203.63		18.0365	1293.86
18.0365	1052.31		18.391	1100.72		18.391	1200.59		18.391	1290.72
18.391	1049.92		18.7455	1099.07		18.7455	1198.22		18.7455	1289.07
18.7455	1047.79		19.1	1099.51		19.1	1197.11		19.1	1289.51
18.7455	1047.79		19.1	1099.51		19.1	1197.11		19.1	1289.51
19.1	1046.31		19.575	1101.97		19.575	1197.08		19.575	1291.97
19.575	1045.11		20.05	1105.89		20.05	1198.92		20.05	1295.89
20.05	1045.41		20.079	1106.24		20.1033	1199.73		20.079	1296.24
20.1234	1046.62		20.2051	1107.79		20.2168	1201.37		20.2051	1297.79
20.2265	1048.22		20.3004	1108.83		20.3004	1202.39		20.3004	1298.83
20.3003	1049.32		20.3234	1109.09		20.324	1202.61		20.3234	1299.09
20.3244	1049.43		20.4365	1110.27		20.4266	1203.34		20.4365	1300.27
20.4183	1049.56		20.5422	1110.78		20.5231	1203.33		20.5422	1300.78
20.507	1049.24		20.5572	1110.81		20.556	1203.2		20.5572	1300.81
20.5548	1048.98		20.6434	1112.04		20.6152	1203.9		20.6434	1302.04
20.5915	1049.31		20.7384	1113.09		20.7025	1204.56		20.7384	1303.09
20.6722	1049.73		20.818	1113.52		20.7848	1204.63		20.818	1303.52
20.7484	1049.62		20.8277	1113.65		20.8141	1204.54		20.8277	1303.65
20.8102	1049.22		20.9132	1114.86		20.8631	1205.37		20.9132	1304.86
20.8207	1049.42		20.9932	1115.91		20.9375	1206.52		20.9932	1305.91
20.8899	1050.66		21.0683	1116.72		21.0075	1207.33		21.0683	1306.72
20.9553	1051.49		21.0788	1116.81		21.0703	1207.78		21.0788	1306.81
21.0171	1051.89		21.5515	1122.73		21.5573	1212.45		21.5515	1312.73
21.0618	1051.99		22.0299	1125.99		22.0483	1215.81		22.0299	1315.99
21.5631	1052.55		22.5146	1129.14		22.5437	1218.63		22.5146	1319.14
22.0667	1055.47		23.0059	1132.7		23.0438	1221.51		23.0059	1322.7
22.5729	1057.97		23.5043	1136.63		23.5489	1224.63		23.5043	1326.63
23.0818	1060.33		24.0103	1140.7		24.0594	1227.91		24.0103	1330.7
23.5936	1063.02		24.5244	1144.71		24.5756	1231.28		24.5244	1334.71
24.1085	1066.03		25.0473	1148.3		25.0979	1234.52		25.0473	1338.3
24.6268	1069.29		25.5795	1151.05		25.6268	1237.13		25.5795	1341.05
25.1485	1072.48		26.1217	1152.66		26.1627	1238.84		26.1217	1342.66
25.6741	1075.11		26.6745	1152.69		26.7061	1239.78		26.6745	1342.69
26.2038	1077.24		27.2388	1150.5		27.2576	1239.62		27.2388	1340.5
26.7378	1079.79		27.7419	1144.89		27.766	1236.42		27.7419	1334.89
27.2764	1082.09		28.245	1133.41		28.2745	1227.35		28.245	1323.41
27.7902	1080.99		28.7481	1115.46		28.7829	1210.83		28.7481	1305.46
28.3039	1073.36		29.2513	1093.89		29.2913	1188.3		29.2513	1283.89
28.8176	1057.4		29.7544	1076.73		29.7997	1167.32		29.7544	1266.73
29.3313	1034.18		30.2575	1070.78		30.3082	1156.89		30.2575	1260.78
29.8451	1010.07		30.7607	1074		30.8166	1156.93		30.7607	1264
30.3588	995.207		31.2638	1078.27		31.325	1159.45		31.2638	1268.27
30.8725	992.353		31.7858	1081.32		31.8468	1159.6		31.7858	1271.32
31.3863	993.542		32	1059.6		32	1148.81		32	1249.6



## LAMPIRAN B TABEL DATA VOLUME FRAKSI PASIR

AFR 3.12		AFR 4.72		AFR 6		AFR 9	
Tinggi (m)	Pasir	Tinggi (m)	Pasir	Tinggi (m)	Pasir	Tinggi (m)	Pasir
5.156698	0	5.204821	0.000397	5.204821	0.003004	5.204821	0.000887
5.16125	0	5.226083	0.001219	5.226083	0.006769	5.226083	0.00268
5.16875	0	5.237867	0.001509	5.237867	0.016498	5.237867	0.005704
5.176251	0	5.2474	0.002605	5.2474	0.019998	5.2474	0.008056
5.204821	0.002085	5.265782	0.004505	5.265782	0.0336	5.265782	0.017514
5.226083	0.005151	5.299409	0.006469	5.299409	0.041655	5.299409	0.026744
5.237867	0.008728	5.344208	0.006965	5.344208	0.048177	5.344208	0.033175
5.2474	0.012516	5.38154	0.007022	5.38154	0.0555	5.38154	0.037304
5.265782	0.019747	5.41265	0.006997	5.41265	0.062558	5.41265	0.039811
5.299409	0.027468	5.438576	0.006998	5.438576	0.067694	5.438576	0.041241
5.344208	0.031185	5.46018	0.007069	5.46018	0.069897	5.46018	0.04206
5.38154	0.033516	5.479978	0.007259	5.479978	0.069144	5.479978	0.042717
5.41265	0.03563	5.499482	0.007846	5.499482	0.065707	5.499482	0.042281
5.438576	0.037977	5.511455	0.011308	5.511455	0.056377	5.511455	0.039665
5.46018	0.040816	5.533427	0.015056	5.533427	0.048859	5.533427	0.042413
5.479978	0.044381	5.572468	0.019921	5.572468	0.042454	5.572468	0.04449
5.499482	0.047652	5.611494	0.026247	5.611494	0.038643	5.611494	0.046246
5.511455	0.047733	5.650504	0.033994	5.650504	0.036884	5.650504	0.047968
5.533427	0.056369	5.6955	0.044588	5.6955	0.040644	5.6955	0.049544
5.572468	0.065858	5.7465	0.05417	5.7465	0.046473	5.7465	0.051108
5.611494	0.076567	5.7975	0.060874	5.7975	0.052748	5.7975	0.053019
5.650504	0.090524	5.8485	0.064515	5.8485	0.058381	5.8485	0.055262
5.6955	0.103752	5.8995	0.06554	5.8995	0.062694	5.8995	0.057745
5.7465	0.108941	5.950501	0.064493	5.950501	0.065394	5.950501	0.059919
5.7975	0.095167	6.0015	0.06214	6.0015	0.066644	6.0015	0.062667
5.8485	0.068647	6.0525	0.059023	6.0525	0.065983	6.0525	0.067007
5.8995	0.047456	6.1035	0.05568	6.1035	0.064317	6.1035	0.072843
5.950501	0.035638	6.1545	0.052458	6.1545	0.061779	6.1545	0.078705
6.0015	0.03075	6.205501	0.049603	6.205501	0.058871	6.205501	0.082023
6.0525	0.030275	6.2565	0.04729	6.2565	0.056204	6.2565	0.081095
6.1035	0.032456	6.3075	0.04559	6.3075	0.054563	6.3075	0.080704
6.1545	0.036011	6.3585	0.044556	6.3585	0.055172	6.3585	0.083816
6.205501	0.040013	6.4095	0.044175	6.4095	0.058108	6.4095	0.090721
6.2565	0.043947	6.460501	0.044405	6.460501	0.061103	6.460501	0.098224
6.3075	0.047641	6.5115	0.045152	6.5115	0.064313	6.5115	0.101704
6.3585	0.051343	6.562501	0.046281	6.562501	0.068436	6.562501	0.102198
6.4095	0.055615	6.613501	0.047673	6.613501	0.072798	6.613501	0.103544
6.460501	0.060933	6.6645	0.04933	6.6645	0.075584	6.6645	0.114355
6.5115	0.067185	6.7155	0.051402	6.7155	0.075984	6.7155	0.127225
6.562501	0.073074	6.766501	0.054143	6.766501	0.077474	6.766501	0.10828
6.613501	0.076465	6.817501	0.057804	6.817501	0.084304	6.817501	0.056185
6.6645	0.074915	6.868501	0.062251	6.868501	0.090979	6.868501	0.021284
6.7155	0.068255	6.9195	0.06704	6.9195	0.126178	6.9195	0.008177
6.766501	0.058918	6.9705	0.072105	6.9705	0.155957	6.9705	0.00358
6.817501	0.050503	7.021501	0.078846	7.021501	0.128661	7.021501	0.001722
6.868501	0.045023	7.0725	0.091009	7.0725	0.096073	7.0725	0.000927
6.9195	0.042111	7.1235	0.114036	7.1235	0.065765	7.1235	0.000057
6.9705	0.039533	7.17261	0.171815	7.17261	0.032895	7.17261	0.000405
7.021501	0.036441	7.198111	0.136241	7.198111	0.049462	7.198111	0.000281
7.0725	0.034424	7.275001	0.121027	7.275001	0.012311	7.275001	0.000022
7.1235	0.034189	7.425	0.076174	7.425	0.002928	7.425	0.000168
7.17261	0.044248	7.575001	0.033279	7.575001	0.000882	7.575001	0.000167
7.198111	0.052917	7.725	0.010105	7.725	0.000037	7.725	0.000171
7.275001	0.047096	7.865277	0.003074	7.865277	0.000157	7.865277	0.000138
7.425	0.030692	7.982775	0.001267	7.982775	0.000103	7.982775	0.000113
7.575001	0.007613	8.076773	0.000644	8.076773	8.48E-05	8.076773	0.000101
7.725	0.004054	8.151972	0.000605	8.151972	7.47E-05	8.151972	9.36E-05
7.865277	0.002108	8.214045	0.00074	8.214045	6.78E-05	8.214045	8.84E-05
7.982775	0.001139	8.271349	0.000865	8.271349	6.21E-05	8.271349	8.48E-05
8.076773	0.000641	8.328652	0.000954	8.328652	5.73E-05	8.328652	8.20E-05
8.151972	0.000397	8.385956	0.001049	8.385956	5.31E-05	8.385956	8.11E-05
8.214045	0.000265	8.46876	0.000544	8.46876	4.87E-05	8.46876	7.90E-05
8.271349	0.000184	8.596015	0.000354	8.596015	4.45E-05	8.596015	6.88E-05
8.328652	0.000132	8.767811	0.000268	8.767811	3.90E-05	8.767811	4.48E-05
8.385956	9.55E-05	8.999735	0.000205	8.999735	3.14E-05	8.999735	3.87E-05
8.46876	7.18E-05	9.312832	0.00013	9.312832	2.34E-05	9.312832	4.26E-05
8.596015	6.76E-05	9.672562	5.39E-05	9.672562	1.94E-05	9.672562	5.17E-05
8.767811	9.10E-05	9.985659	7.71E-06	9.985659	3.14E-05	9.985659	4.52E-05

8.999735	0.000126		10.21758	1.14E-05		10.21758	3.86E-05		10.21758	2.74E-05
9.312832	0.00011		10.38938	1.16E-05		10.38938	4.43E-05		10.38938	1.34E-05
9.672562	5.34E-05		10.51663	1.32E-05		10.51663	5.37E-05		10.51663	5.64E-06
9.985659	1.49E-05		10.59944	1.25E-05		10.59944	6.50E-05		10.59944	7.66E-06
10.21758	7.33E-06		10.65674	1.39E-05		10.65674	8.17E-05		10.65674	8.52E-06
10.38938	1.15E-05		10.71405	1.45E-05		10.71405	0.0001		10.71405	8.46E-06
10.51663	8.92E-06		10.77135	1.41E-05		10.77135	0.000115		10.77135	7.59E-06
10.59944	9.50E-06		10.84574	1.34E-05		10.84574	0.00013		10.84574	7.12E-06
10.65674	1.00E-05		10.94866	1.30E-05		10.94866	0.000136		10.94866	6.84E-06
10.71405	1.04E-05		11.07731	1.44E-05		11.07731	0.000143		11.07731	1.01E-05
10.77135	1.03E-05		11.23812	2.64E-05		11.23812	0.000161		11.23812	1.24E-05
10.84574	9.72E-06		11.43914	4.82E-05		11.43914	0.000205		11.43914	1.40E-05
10.94866	9.60E-06		11.69041	5.93E-05		11.69041	0.000243		11.69041	1.61E-05
11.07731	9.40E-06		11.92	6.14E-05		11.92	0.000278		11.92	1.70E-05
11.23812	9.48E-06		12.18725	4.25E-05		12.18725	0.000216		12.18725	1.98E-05
11.43914	9.75E-06		12.54175	3.21E-05		12.54175	0.000186		12.54175	1.98E-05
11.69041	9.57E-06		12.89625	3.15E-05		12.89625	0.000173		12.89625	1.76E-05
11.92	7.98E-06		13.25075	3.98E-05		13.25075	0.000168		13.25075	2.06E-05
12.18725	2.22E-06		13.60525	5.28E-05		13.60525	0.00017		13.60525	3.10E-05
12.54175	9.40E-07		13.95975	5.83E-05		13.95975	0.000171		13.95975	4.51E-05
12.89625	1.57E-07		14.31425	5.84E-05		14.31425	0.000169		14.31425	6.04E-05
13.25075	1.38E-13		14.66875	5.30E-05		14.66875	0.000165		14.66875	7.79E-05
13.60525	2.83E-26		15.02325	3.90E-05		15.02325	0.000162		15.02325	9.64E-05
13.95975	0		15.37775	2.58E-05		15.37775	0.00016		15.37775	0.00011
14.31425	0		15.73225	1.90E-05		15.73225	0.00016		15.73225	0.000111
14.66875	0		16.08675	1.60E-05		16.08675	0.00016		16.08675	0.0001
15.02325	0		16.44125	1.47E-05		16.44125	0.000157		16.44125	8.33E-05
15.37775	0		16.79575	1.46E-05		16.79575	0.000152		16.79575	6.66E-05
15.73225	0		17.15025	1.56E-05		17.15025	0.000145		17.15025	5.38E-05
16.08675	0		17.50475	1.83E-05		17.50475	0.000137		17.50475	4.55E-05
16.44125	0		17.85925	2.39E-05		17.85925	0.00013		17.85925	4.13E-05
16.79575	0		18.21375	3.33E-05		18.21375	0.000123		18.21375	4.04E-05
17.15025	0		18.56825	4.52E-05		18.56825	0.000117		18.56825	4.20E-05
17.50475	0		18.92275	5.58E-05		18.92275	0.000113		18.92275	4.56E-05
17.85925	0		19.14356	5.39E-05		19.14356	0.000108		19.14356	5.19E-05
18.21375	0		19.38106	5.19E-05		19.38106	0.000105		19.38106	5.65E-05
18.56825	0		19.8125	4.58E-05		19.8125	9.96E-05		19.8125	6.40E-05
18.92275	0		20.10143	4.29E-05		20.10143	9.84E-05		20.10143	7.08E-05
19.14356	0		20.20552	4.75E-05		20.20552	9.92E-05		20.20552	6.87E-05
19.38106	0		20.27926	5.37E-05		20.27926	9.91E-05		20.27926	6.66E-05
19.8125	0		20.32955	3.78E-05		20.32955	9.81E-05		20.32955	7.09E-05
20.10143	0		20.40659	3.87E-05		20.40659	9.84E-05		20.40659	6.99E-05
20.20552	0		20.4995	3.84E-05		20.4995	9.80E-05		20.4995	6.89E-05
20.27926	0		20.54997	3.81E-05		20.54997	9.69E-05		20.54997	6.78E-05
20.32955	0		20.59326	3.34E-05		20.59326	9.77E-05		20.59326	7.05E-05
20.40659	0		20.67212	3.32E-05		20.67212	9.74E-05		20.67212	7.02E-05
20.4995	0		20.75169	3.30E-05		20.75169	9.66E-05		20.75169	6.98E-05
20.54997	0		20.80114	3.22E-05		20.80114	9.56E-05		20.80114	6.93E-05
20.59326	0		20.83806	3.43E-05		20.83806	9.76E-05		20.83806	7.03E-05
20.67212	0		20.89916	3.41E-05		20.89916	9.69E-05		20.89916	7.04E-05
20.75169	0		20.96719	3.37E-05		20.96719	9.60E-05		20.96719	7.04E-05
20.80114	0		21.03144	3.37E-05		21.03144	9.50E-05		21.03144	7.01E-05
20.83806	0		21.06412	3.44E-05		21.06412	9.39E-05		21.06412	6.96E-05
20.89916	0		21.31303	3.31E-05		21.31303	8.53E-05		21.31303	7.28E-05
20.96719	0		21.80946	3.25E-05		21.80946	7.71E-05		21.80946	7.58E-05
21.03144	0		22.30914	3.28E-05		22.30914	6.87E-05		22.30914	7.84E-05
21.06412	0		22.81229	3.41E-05		22.81229	6.21E-05		22.81229	8.04E-05
21.31303	0		23.31917	3.65E-05		23.31917	6.03E-05		23.31917	8.33E-05
21.80946	0		23.83002	4.02E-05		23.83002	6.37E-05		23.83002	9.11E-05
22.30914	0		24.34513	4.34E-05		24.34513	7.07E-05		24.34513	0.000108
22.81229	0		24.8648	3.84E-05		24.8648	8.09E-05		24.8648	0.000137
23.31917	0		25.38935	2.44E-05		25.38935	9.66E-05		25.38935	0.000161
23.83002	0		25.91911	1.43E-05		25.91911	0.000118		25.91911	0.000124
24.34513	0		26.45446	1.51E-05		26.45446	0.000126		26.45446	6.47E-05
24.8648	0		26.99578	1.20E-05		26.99578	0.000103		26.99578	4.62E-05
25.38935	0		27.52365	1.73E-06		27.52365	7.26E-05		27.52365	5.00E-05
25.91911	0		28.035	4.85E-07		28.035	4.19E-05		28.035	6.41E-05
26.45446	0		28.54635	6.18E-07		28.54635	2.12E-05		28.54635	8.39E-05
26.99578	0		29.0577	2.39E-10		29.0577	1.02E-05		29.0577	8.92E-05
27.52365	0		29.56905	2.52E-20		29.56905	5.65E-06		29.56905	5.37E-05

## LAMPIRAN C TABEL DATA KECEPATAN *SUPERFICIAL*

AFR 3.12		AFR 4.72		AFR 6		AFR 9	
Tinggi (m)	Kecepatan (m/s)	Tinggi (m)	Kecepatan (m/s)	Tinggi (m)	Kecepatan (m/s)	Tinggi (m)	Kecepatan (m/s)
5.156698	9.57434	5.156698	12.892839	5.156698	15.0625161	5.156698	16.034252
5.16125	9.07564	5.16125	11.89332	5.16125	14.83622	5.16125	15.53232
5.16875	8.52536	5.16875	11.578372	5.16875	14.05242	5.16875	14.51234
5.176251	8.023837	5.176251	11.372322	5.176251	13.04211	5.176251	14.05425
5.204821	7.537873	5.204821	11.9384	5.204821	6.6564751	5.204821	12.032124
5.226083	7.0703826	5.226083	10.923737	5.226083	5.6376228	5.226083	11.034251
5.237867	7.5044298	5.237867	10.93272	5.237867	4.6405277	5.237867	10.04635
5.2474	6.5416627	5.2474	10.81234	5.2474	4.7546988	5.2474	9.7361717
5.265782	6.2653518	5.265782	10.62345	5.265782	4.4473233	5.265782	8.5911608
5.299409	6.1434107	5.299409	10.66578	5.299409	4.8035541	5.299409	8.250515
5.344208	6.164928	5.344208	10.50946	5.344208	5.0231156	5.344208	7.923646
5.38154	5.9330506	5.38154	10.465261	5.38154	4.7720504	5.38154	7.3118253
5.41265	5.6694288	5.41265	10.37462	5.41265	4.5253029	5.41265	6.7916679
5.438576	5.4006519	5.438576	10.23655	5.438576	4.3781648	5.438576	6.3942795
5.46018	5.1393752	5.46018	10.23672	5.46018	4.3195891	5.46018	6.1029639
5.479978	4.8734956	5.479978	10.29121	5.479978	4.3826895	5.479978	5.8837924
5.499482	4.6016216	5.499482	10.274733	5.499482	4.5296297	5.499482	5.5954909
5.511455	4.6742587	5.511455	10.22512	5.511455	4.9593196	5.511455	6.0391502
5.533427	4.2881603	5.533427	11.05462	5.533427	5.1935778	5.533427	5.6932936
5.572468	3.7551856	5.572468	11.51621	5.572468	5.7465167	5.572468	5.2407737
5.611494	3.2910945	5.611494	10.02522	5.611494	6.080792	5.611494	4.8793602
5.650504	2.8809996	5.650504	9.06211	5.650504	6.2204709	5.650504	4.5961623
5.6955	2.5013635	5.6955	7.5915809	5.6955	6.1335211	5.6955	4.2804618
5.7465	2.2416458	5.7465	6.8798127	5.7465	5.8846588	5.7465	3.9212374
5.7975	2.2485287	5.7975	6.4669597	5.7975	5.6022897	5.7975	3.5852246
5.8485	2.5631487	5.8485	6.2011003	5.8485	5.3344488	5.8485	3.2425005
5.8995	3.0840576	5.8995	6.0181456	5.8995	5.0949287	5.8995	2.890466
5.950501	3.593297	5.950501	5.8931179	5.950501	4.885035	5.950501	2.5270646
6.0015	3.9445391	6.0015	5.8006592	6.0015	4.7028666	6.0015	2.1551172
6.0525	4.077302	6.0525	5.7212777	6.0525	4.550652	6.0525	1.7978745
6.1035	4.0332479	6.1035	5.6426225	6.1035	4.441843	6.1035	1.4879599
6.1545	3.9063737	6.1545	5.5561304	6.1545	4.3880653	6.1545	1.2459944
6.205501	3.7670405	6.205501	5.4559693	6.205501	4.3881931	6.205501	1.0838408
6.2565	3.6460831	6.2565	5.339817	6.2565	4.4566941	6.2565	1.0111924
6.3075	3.5459452	6.3075	5.2073803	6.3075	4.60144	6.3075	1.0231165
6.3585	3.4517782	6.3585	5.0612888	6.3585	4.7763119	6.3585	1.0640162
6.4095	3.3383963	6.4095	4.9073663	6.4095	4.8678818	6.4095	1.0821569
6.460501	3.1763883	6.460501	4.7527189	6.460501	4.7547231	6.460501	1.0644175
6.5115	2.9516268	6.5115	4.605597	6.5115	4.4522257	6.5115	1.0375687
6.562501	2.6779771	6.562501	4.4753838	6.562501	4.0372586	6.562501	1.0048239
6.613501	2.3855894	6.613501	4.370543	6.613501	3.5899909	6.613501	0.92287064
6.6645	2.1173172	6.6645	4.2916636	6.6645	3.1704724	6.6645	0.92145109
6.7155	1.9161259	6.7155	4.2275414	6.7155	2.768105	6.7155	0.97801143
6.766501	1.8068817	6.766501	4.1518054	6.766501	2.3520555	6.766501	0.89037699
6.817501	1.7807468	6.817501	4.0277486	6.817501	1.9074188	6.817501	0.81908369
6.868501	1.8025777	6.868501	3.8282034	6.868501	1.4234113	6.868501	1.0089263
6.9195	1.8458033	6.9195	3.5724828	6.9195	0.91015273	6.9195	1.6062555
6.9705	1.884791	6.9705	3.2972701	6.9705	0.52456498	6.9705	2.4715059
7.021501	1.9027017	7.021501	3.0038581	7.021501	0.47116303	7.021501	3.4293025
7.0725	1.8992143	7.0725	2.638128	7.0725	0.5006991	7.0725	4.184402
7.1235	1.8971888	7.1235	2.159466	7.1235	0.6285535	7.1235	4.5754242
7.1761	1.9321995	7.1761	1.7927709	7.1761	0.8619653	7.1761	4.4952612
7.198111	1.7615228	7.198111	2.1462872	7.198111	0.76063156	7.198111	6.5110579
7.275001	1.7795283	7.275001	1.5038	7.275001	1.6140308	7.275001	6.1985269
7.425	1.5470413	7.425	0.99364179	7.425	3.0518861	7.425	5.5631762
7.575001	1.698777	7.575001	0.93390119	7.575001	5.0926242	7.575001	4.6773586
7.725	1.7603116	7.725	1.1185956	7.725	1.81531448	7.725	5.4998617
7.865277	1.8062438	7.865277	2.0041394	7.865277	8.062121	7.865277	8.7023544
7.982775	1.9053078	7.982775	3.6943223	7.982775	7.02432	7.982775	8.024342
8.076773	2.0323255	8.076773	5.4537301	8.076773	6.054632	8.076773	7.042154
8.151972	2.1510272	8.151972	6.0490465	8.151972	5.012367	8.151972	6.054352
8.214045	2.2506464	8.214045	5.891367	8.214045	5.03421	8.214045	6.012543
8.271349	2.3429959	8.271349	5.3954515	8.271349	5.056722	8.271349	6.054533
8.328652	2.4313445	8.328652	4.7572389	8.328652	5.34251	8.328652	6.04532
8.385956	2.5004296	8.385956	4.156239	8.385956	5.034252	8.385956	5.03622
8.46876	2.5728106	8.46876	3.3545537	8.46876	4.04251	8.46876	4.0453521
8.596015	2.6152303	8.596015	2.0268829	8.596015	5.012433	8.596015	10.017599
8.767811	2.5095782	8.767811	1.9604279	8.767811	5.04254	8.767811	8.0125675
8.999735	2.2073715	8.999735	3.9032781	8.999735	4.03451	8.999735	8.045432
9.312832	1.7622557	9.312832	5.5222402	9.312832	4.035462	9.312832	10.034252
9.672562	1.4525325	9.672562	6.2867594	9.672562	3.2778585	9.672562	9.024332
9.985659	1.6037359	9.985659	6.4531007	9.985659	7.8742986	9.985659	9.0543522

10.21758	2.4611192	10.21758	6.4515443	10.21758	6.043542	10.21758	9.06321
10.38938	3.1631265	10.38938	5.3832011	10.38938	6.02434	10.38938	9.0543524
10.51663	3.5156181	10.51663	4.7882051	10.51663	6.04352	10.51663	8.6636253
10.59944	3.6554666	10.59944	4.5193052	10.59944	7.034252	10.59944	8.594833
10.65674	3.7072752	10.65674	4.3553262	10.65674	7.034521	10.65674	8.45362
10.71405	3.7551239	10.71405	4.227622	10.71405	6.05454	10.71405	8.362763
10.77135	3.7641683	10.77135	4.0919838	10.77135	6.045245	10.77135	8.482283
10.84574	3.7110934	10.84574	3.9401779	10.84574	6.02256	10.84574	8.226562
10.94866	3.6106062	10.94866	3.7488344	10.94866	6.03476	10.94866	8.162622
11.07731	3.4396291	11.07731	3.487134	11.07731	6.05452	11.07731	8.054543
11.23812	3.2093794	11.23812	3.1898837	11.23812	6.03523	11.23812	8.016563
11.43914	2.9329185	11.43914	3.0059905	11.43914	6.4410167	11.43914	10.01223
11.69041	2.6341674	11.69041	3.0582197	11.69041	4.2690632	11.69041	9.0163256
11.92	2.4432602	11.92	3.1192622	11.92	2.845737	11.92	9.01452
12.18725	2.2928789	12.18725	3.193048	12.18725	2.1884713	12.18725	9.012553
12.54175	2.1034832	12.54175	3.1076965	12.54175	1.7755433	12.54175	8.013233
12.89625	1.9480723	12.89625	2.9229448	12.89625	1.7698873	12.89625	7.94543
13.25075	1.8024107	13.25075	2.6729782	13.25075	1.8378866	13.25075	7.827362
13.60525	1.671236	13.60525	2.4286871	13.60525	1.9111285	13.60525	7.7056533
13.95975	1.5657606	13.95975	2.2505953	13.95975	2.0049844	13.95975	7.617627
14.31425	1.4915124	14.31425	2.1519868	14.31425	2.1285722	14.31425	7.506654
14.66875	1.4456837	14.66875	2.1277847	14.66875	2.2901218	14.66875	7.4098974
15.02325	1.4201404	15.02325	2.1722963	15.02325	2.4882851	15.02325	7.80783
15.37775	1.4063385	15.37775	2.2712595	15.37775	2.7129297	15.37775	8.01653
15.73225	1.3983212	15.73225	2.4054053	15.73225	2.9529026	15.73225	8.329464
16.08675	1.3938279	16.08675	2.5556302	16.08675	3.2013977	16.08675	8.223506
16.44125	1.3933672	16.44125	2.705169	16.44125	3.4538314	16.44125	8.1351662
16.79575	1.3979131	16.79575	2.8386178	16.79575	3.7038279	16.79575	8.0492554
17.15025	1.4079882	17.15025	2.9380827	17.15025	3.9424121	17.15025	7.9534087
17.50475	1.4229224	17.50475	2.9833276	17.50475	4.159524	17.50475	7.8459091
17.85925	1.4416661	17.85925	2.9592891	17.85925	4.3458338	17.85925	7.7321854
18.21375	1.4632469	18.21375	2.8646321	18.21375	4.4932408	18.21375	7.6185627
18.56825	1.4871584	18.56825	2.7125871	18.56825	4.5971351	18.56825	7.5083961
18.92275	1.5129849	18.92275	2.5415974	18.92275	4.657423	18.92275	7.4060922
19.14356	1.5478969	19.14356	2.3353398	19.14356	4.6237817	19.14356	7.3246856
19.38106	1.5495858	19.38106	2.3082459	19.38106	4.7416458	19.38106	7.174159
19.8125	1.5899332	19.8125	2.1889338	19.8125	4.5992632	19.8125	7.1819706
20.10143	1.6063716	20.10143	2.2284632	20.10143	4.5632706	20.10143	7.1710262
20.20552	1.6132156	20.20552	2.1609411	20.20552	4.5096631	20.20552	7.2195754
20.27926	1.6204398	20.27926	2.1034994	20.27926	4.4565854	20.27926	7.2714353
20.32955	1.6258899	20.32955	2.2608604	20.32955	4.5195189	20.32955	7.1673965
20.40659	1.6316179	20.40659	2.1944582	20.40659	4.475533	20.40659	7.205162
20.4995	1.6380507	20.4995	2.1378734	20.4995	4.4318004	20.4995	7.2471104
20.54997	1.6446126	20.54997	2.0913699	20.54997	4.3872695	20.54997	7.2924809
20.59326	1.6609652	20.59326	2.2860475	20.59326	4.3952613	20.59326	7.2271557
20.67212	1.6668346	20.67212	2.2318423	20.67212	4.3633294	20.67212	7.2619677
20.75169	1.6732893	20.75169	2.1846759	20.75169	4.3309975	20.75169	7.3009071
20.80114	1.6801699	20.80114	2.1443992	20.80114	4.2972665	20.80114	7.3444762
20.83806	1.689823	20.83806	2.3607001	20.83806	4.3048058	20.83806	7.2733393
20.89916	1.7048414	20.89916	2.3184025	20.89916	4.2874088	20.89916	7.3053403
20.96719	1.7116623	20.96719	2.2812877	20.96719	4.2709937	20.96719	7.3420253
21.03144	1.7192792	21.03144	2.2483091	21.03144	4.2548051	21.03144	7.3837461
21.06412	1.727829	21.06412	2.2188244	21.06412	4.2372227	21.06412	7.4314299
21.31303	1.7225941	21.31303	2.3342147	21.31303	4.2146978	21.31303	7.2104478
21.80946	1.7098129	21.80946	2.3536391	21.80946	4.1012797	21.80946	6.9623446
22.30914	1.6894069	22.30914	2.3479381	22.30914	3.9967811	22.30914	6.6878109
22.81229	1.6685169	22.81229	2.3073597	22.81229	3.884995	22.81229	6.3829288
23.31917	1.6455556	23.31917	2.2271035	23.31917	3.7423666	23.31917	6.0044947
23.83002	1.6186829	23.83002	2.1132476	23.83002	3.5495541	23.83002	5.4934173
24.34513	1.5852596	24.34513	1.9901011	24.34513	3.2825522	24.34513	4.7994962
24.8648	1.5420059	24.8648	1.8892511	24.8648	2.9132116	24.8648	3.9542031
25.38935	1.4860774	25.38935	1.8221047	25.38935	2.439924	25.38935	3.13237
25.91911	1.4147069	25.91911	1.7691209	25.91911	1.9261245	25.91911	2.5547681
26.45446	1.3263619	26.45446	1.7142142	26.45446	1.4913061	26.45446	2.2627389
26.99578	1.2221014	26.99578	1.6553727	26.99578	1.2245629	26.99578	2.1541359
27.52365	1.1093065	27.52365	1.589785	27.52365	1.1076244	27.52365	2.0971572
28.035	0.99471706	28.035	1.5005844	28.035	1.0665175	28.035	1.9261622
28.54635	0.86654669	28.54635	1.3778436	28.54635	1.0449737	28.54635	1.6502391
29.0577	0.72566921	29.0577	1.2460233	29.0577	1.0219131	29.0577	1.3863299
29.56905	0.57107532	29.56905	1.1169627	29.56905	0.9860388	29.56905	1.1755143
30.0804	0.40652716	30.0804	0.98547995	30.0804	0.96049374	30.0804	1.0107014
30.59175	0.26836556	30.59175	0.84489542	30.59175	1.0328279	30.59175	0.92700392
31.1031	0.22227417	31.1031	0.70074582	31.1031	1.1308178	31.1031	1.1282721
31.42939	0.20758538	31.42939	0.49648291	31.42939	0.82733595	31.42939	1.4601935

## LAMPIRAN D TABEL DATA KECEPATAN PASIR

AFR 3.12			AFR 4.72			AFR 6			AFR 9		
Tinggi (m)	Pasir		Tinggi (m)	Pasir		Tinggi (m)	Pasir		Tinggi (m)	Pasir	
5.156690	0		5.156698	0		5.156698	0		5.156698	0	
5.16125			5.16125			5.16125			5.16125		
5.16875	0		5.16875	0		5.16875	0		5.16875	0	
5.176251	0		5.176251	0		5.176251	0		5.176251	0	
5.204821	2.568529		5.204821	5.26195		5.204821	3.510035		5.204821	5.486996	
5.224474	2.506025		5.226083	5.437431		5.226083	3.604693		5.226083	5.66185	
5.236258	2.2563		5.237867	4.735874		5.237867	2.696572		5.237867	4.105587	
5.2474	2.159138		5.2474	4.936877		5.2474	3.301752		5.2474	4.625522	
5.265782	2.024445		5.265782	4.772921		5.265782	2.93481		5.265782	4.070591	
5.299409	1.7511		5.299409	4.939004		5.299409	2.974372		5.299409	3.682421	
5.344208	1.641111		5.344208	5.208257		5.344208	2.751269		5.344208	3.297119	
5.38154	1.583477		5.38154	5.455458		5.38154	2.667723		5.38154	3.015976	
5.41265	1.54664		5.41265	5.668701		5.41265	2.223439		5.41265	2.818146	
5.438576	1.514962		5.438576	5.839543		5.438576	2.048352		5.438576	2.678808	
5.46018	1.47891		5.46018	5.970213		5.46018	1.939087		5.46018	2.580129	
5.47997	1.428616		5.479978	6.075736		5.479978	1.8783		5.479978	2.495776	
5.49592	1.378863		5.499482	6.144974		5.499482	1.848806		5.499482	2.407559	
5.507883	1.32279		5.511455	5.834032		5.511455	2.038687		5.511455	2.629531	
5.533365	1.172418		5.533427	5.745541		5.533427	2.169952		5.533427	2.459545	
5.572378	0.933106		5.572468	5.576383		5.572468	2.430685		5.572468	2.32471	
5.61141	0.662088		5.611494	5.378669		5.611494	2.745129		5.611494	2.211569	
5.64913	0.477229		5.650504	5.180825		5.650504	3.068181		5.650504	2.115993	
5.668667	0.861808		5.6955	4.977445		5.6955	3.429717		5.6955	2.007216	
5.6955	0.857293		5.7465	4.842804		5.7465	3.664253		5.7465	1.89108	
5.7465	0.917131		5.7975	4.752881		5.7975	3.801516		5.7975	1.762658	
5.797501	1.021452		5.8485	4.696441		5.8485	3.859959		5.8485	1.613974	
5.8485	1.146081		5.8995	4.658121		5.8995	3.871433		5.8995	1.445861	
5.8995	1.266477		5.950501	4.631803		5.950501	3.852032		5.950501	1.262921	
5.950501	1.349919		6.0015	4.612109		6.0015	3.812658		6.0015	1.063025	
6.0015	1.32251		6.0525	4.593791		6.0525	3.76147		6.0525	0.841182	
6.0525	1.172804		6.1035	4.571448		6.1035	3.708613		6.1035	0.615297	
6.1035	0.975655		6.1545	4.541684		6.1545	3.652108		6.1545	0.446676	
6.1545	0.836831		6.205501	4.499867		6.205501	3.599452		6.205501	0.342079	
6.2055	0.829939		6.2565	4.442828		6.2565	3.54988		6.2565	0.316067	
6.2565	0.849603		6.3075	4.368484		6.3075	3.500856		6.3075	0.342537	
6.3075	0.805459		6.3585	4.276075		6.3585	3.420967		6.3585	0.37401	
6.358501	0.737137		6.4095	4.166457		6.4095	3.267519		6.4095	0.378097	
6.409501	1.095285		6.460501	4.042192		6.460501	3.092698		6.460501	0.339821	
6.460501	1.875101		6.5115	3.907723		6.5115	2.902465		6.5115	0.263883	
6.5115	2.099256		6.562501	3.769559		6.562501	2.668791		6.562501	0.167886	
6.5625	2.118443		6.613501	3.635451		6.613501	2.393768		6.613501	0.16316	
6.613501	2.075071		6.6645	3.511384		6.6645	2.119084		6.6645	0.372351	
6.6645	2.002073		6.7155	3.398766		6.7155	1.890748		6.7155	0.5603	
6.7155	1.889595		6.766501	3.290022		6.766501	1.670804		6.766501	0.70176	
6.766501	1.653129		6.817501	3.167615		6.817501	1.398397		6.817501	0.899684	
6.8175	0		6.868501	3.020072		6.868501	1.02507		6.868501	1.179384	
6.868501	0		6.9195	2.842567		6.9195	0.561333		6.9195	1.580191	
6.9195	0		6.9705	2.637613		6.9705	0.146706		6.9705	2.191566	
6.9705	0		7.021501	2.392136		7.021501	0.365317		7.021501	3.082934	
7.021501	0		7.0725	2.068292		7.0725	0.471575		7.0725	4.219464	
7.0725	0		7.1235	1.632952		7.1235	0.500893		7.1235	4.539004	
7.1235	0		7.17261	1.143021		7.17261	0.53947		7.17261	6.553252	
7.174501	0		7.198111	1.375823		7.198111	0.410754		7.198111	5.18727	
7.248561	0		7.275001	0.721535		7.275001	0.780438		7.275001	6.367951	
7.323561	0		7.425	0.481407		7.425	1.966135		7.425	8.323258	
7.425	0		7.575001	0.637095		7.575001	3.729256		7.575001	9.066846	
7.575001	0		7.725	0.787271		7.725	5.132948		7.725	9.142016	
7.725	0		7.865277	1.198261		7.865277	6.046151		7.865277	8.617535	
7.847567	0		7.982775	2.174708		7.982775	6.44835		7.982775	7.937333	
7.912844	0		8.076773	3.092767		8.076773	6.812037		8.076773	7.444457	
7.982775	0		8.151972	3.199231		8.151972	7.040325		8.151972	7.280173	
8.076773	0		8.214045	2.892278		8.214045	7.180996		8.214045	7.325965	
8.151972	0		8.271349	2.490158		8.271349	7.269185		8.271349	7.446809	
8.214045	0		8.328652	2.06378		8.328652	7.310308		8.328652	7.530295	
8.271349	0		8.385956	1.644516		8.385956	7.293499		8.385956	7.465713	
8.328651	0		8.46876	1.236089		8.46876	7.139683		8.46876	7.0276	
8.385956	0		8.596015	2.270118		8.596015	6.795154		8.596015	5.651196	
8.46876	0		8.767811	3.672453		8.767811	6.276058		8.767811	4.685636	
8.596015	0		8.999735	5.027482		8.999735	5.643706		8.999735	9.967813	
8.767811	0		9.312832	5.920351		9.312832	4.07757		9.312832	13.07519	
8.999735	0		9.672562	5.518779		9.672562	2.853779		9.672562	13.99456	
9.312832	0		9.985659	0		9.985659	4.663189		9.985659	12.40533	

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BIODATA PENULIS



**Ahmad Obrain Ghifari** dilahirkan di Prabumulih 24 Oktober 1995 dari orangtua yang bernama Subli Ibrahim dan Yusnani Azis. Penulis menghabiskan masa kanak-kanak dan tumbuh bersama seorang kakak perempuan yang bernama Masita Arliani Pratami dan seorang adik laki-laki bernama Muhammad Farhan Tribakti. Pendidikan formal yang ditempuh penulis dimulai dari SD Islam Az-Zahra Palembang tahun 2001-2007. Kemudian dilanjutkan ke SMP Negeri 1

Palembang pada tahun 2007-2010 dan SMA LTI Indo Global Mandiri Palembang pada tahun 2010-2013. Selanjutnya penulis melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi negeri di kota Surabaya yaitu Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan mengambil Jurusan Teknik Mesin ITS S1.

Penulis sangat aktif dalam kegiatan akademik dan non akademik selama berkuliah di ITS Surabaya. Penulis pernah menjadi asisten Laboratorium Rekayasa Termal. Di bidang non akademik, penulis aktif di Lembaga Dakwah Teknik Mesin ITS Ash-Shaff sebagai staff Media dan Komunikasi pada 2014-2015 dan dilanjutkan menjadi Bendahara Umum pada 2015-2016. Selanjutnya penulis juga menjadi Koordinator Laboratorium Rekayasa Termal pada tahun 2016-2017.

Motto hidup penulis adalah *“Do the best, God the rest”*. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir, ini dapat menghubungi penulis melalui email [ghifariobrain@gmail.com](mailto:ghifariobrain@gmail.com).

